



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SAARA HAINARI

MASSASTABILOINNIN VAIKUTUS MAAN INDEKSI- JA GEOTEK-
NISIIN OMINAISUUKSIIN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa
7.10.2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

HAINARI, SAARA: Massastabiloinnin vaikutus maan indeksi- ja geoteknisiin ominaisuuksiin

Diplomityö, 121 sivua, 26 liitesivua

Tammikuu 2016

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: stabilointi, massastabilointi, pohjanvahvistus, kiinteytys, ylijäämäsave, stabiloituvuustutkimukset, sideainereaktiot

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, kuinka massastabilointi muuttaa pehmeän maan indeksi- ja geoteknisiä ominaisuuksia maan hyötykäytön kannalta. Stabiloidun maan tutkimus on rajoittunut Suomessa pääasiassa lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Stabiloidun maan käyttäytymiseen vaikuttavat lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien lisäksi esimerkiksi vesipitoisuus, konsistenssi sekä vedenläpäisevyys, joten pelkkiä lujuusominaisuuksia laajempi tarkastelu oli tarpeen.

Tutkimus koostui kirjallisuusselvityksestä ja laboratoriotutkimuksista. Työssä tutkittiin kuutta pehmeää runkoainetta, joiden indeksi- ja geotekniset ominaisuudet tunnettiin. Kolme runkoaineista oli savia, yksi oli savinen lieju ja kaksi oli turpeita. Runkoaineita stabiloitiin erilaisilla sideaineresepteillä, minkä jälkeen koekappaleet koestettiin 7 - 180 vuorokauden iässä. Tutkittavia ominaisuuksia olivat vesipitoisuus, tilavuuspaino, konsistenssirajat (savisilla runkoaineilla), puristuslujuus, kimmomoduuli E_{50} sekä penetrometrillä määritettävä kärkivastus. Turpeista määritettiin myös esikuormituksen aikainen painuma. Testausohjelma oli jaettu kahteen lujuustavoitteiltaan ja sideaineresepteiltään erilaiseen osaan: pohjanvahvistusta simuloivaan osaan sekä ylijäämäsaveen kiinteytystä jäljittelevään osaan. Työssä arvioitiin myös olemassa olevien laboratoriomäärittämismenetelmien soveltuvuutta stabiloidun maan lujuusominaisuuksia laajempaan tutkimiseen. Työssä käytetyllä penetrometrillä saatavan kärkivastuksen havaittiin olevan noin 10-kertainen laboratoriossa määritettyyn puristuslujuuteen verrattuna.

Tutkimustulokset vahvistivat kirjallisuudessa kuvattuja tuloksia. Maan puristus- ja leikkauslujuus kasvavat, ja murtomuodonmuutos pienenee, jolloin myös maan jäykkyys ja kimmomoduuli E_{50} kasvavat. Vesipitoisuus pienenee, ja maan tilavuuspaino pysyy lähes ennallaan. Vesipitoisuuden pienenemisestä vain pieni osa aiheutuu sideainereaktioihin sitoutuvasta vedestä, ja suurin muutos johtuu kuiva-aineksen määrän kasvusta. Maan juoksuraja kasvaa yleensä, mutta erittäin plastisen tai orgaanista ainesta sisältävän maan juoksuraja voi pienentyä. Plastisuusraja kasvaa kaikissa tapauksissa. Yhdessä vesipitoisuuden pienenemisen kanssa konsistenssi siirtyy kohti plastista tai kiinteää, ja maan rakenne pystyy pidättämään alkuperäistä enemmän vettä ilman, että konsistenssi muuttuu. Tällöin maarakennusominaisuudet paranevat. Vedenläpäisevyys kasvaa usein lyhyellä aikavälillä, mutta joissain tapauksissa se muuttuu jopa alkuperäistä pienemmäksi pitkän ajan kuluessa. Lentotuhkalla kiinteytetyn pehmeän saveen ominaisuudet muuttuivat selvästi maarakentamiseen paremmin sopiviksi, mutta saveen hyötykäytön kannalta ominaisuuksien olisi pitänyt muuttua vielä enemmän.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

HAINARI, SAARA: Index and Geotechnical Properties of Mass Stabilized Soil

Master of Science Thesis, 121 pages, 26 Appendix pages

January 2016

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: mass stabilization, stabilization, ground improvement, solidification, surplus clay, stabilization testing, binding agents

The main objective of this thesis was to produce information on the index and engineering properties of mass stabilized soil. The focus has typically been on the strength and deformation properties of the stabilized soil. However, a comprehensive understanding of the behavior of the stabilized soil requires a more versatile range of soil properties. Therefore, it is crucial to consider the index properties and other engineering properties such as the permeability of the stabilized soil as well.

A series of laboratory tests was conducted on six soil samples. Three of the soil samples were soft clays, one was organic clay, and two of the samples were peats. After a curing period of 7 - 180 days the water content, bulk density, plastic and liquid limits, unconfined compressive strength, modulus of elasticity and the permeability of the stabilized soil samples were investigated. In addition, the penetration resistance was measured by a hand-penetrometer and the settlements of the peat samples during the preloading were measured. The laboratory testing program was divided into two target strength levels. The first target strength level and the binder recipes used were designed to simulate traditional mass stabilization and subgrade improvement as the second simulated solidification of excavated soft soil masses.

It was observed that the unconfined compressive strength and the shear strength of the stabilized soil increase. The strains at failure decrease and the modulus of elasticity increases with the increasing strength. The water content of the soil decreases and the bulk density increases slightly or remains the same. However, the change in the water content is mainly caused by the introduction of dry binder particles into the soil and not by the water consumed in the reactions. The plastic limit increases and the liquid limit either increases or decreases, depending on the plasticity of the soil and the quantity of the organic matter. A simultaneous reduction in the water content and an increase in the plastic and liquid limits result in more workable soil. The permeability of the soil may increase at first but the permeability usually decreases with time.

The results showed that the index properties of the solidified surplus clay were distinctly modified towards a more workable state, but the changes should have been more significant for the soft soil to be utilizable as earth construction material for example. It was also observed that the penetration resistance measured by the penetrometer model used in this study was approximately $10q_u$.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:ssä, ja työ on osa valtakunnallista UUMA2-ohjelmaa, jonka tavoitteena on kehittää uusiomaarakentamista. Työn ovat rahoittaneet UUMA2-hanke sekä Ramboll Finland Oy.

Työtä ei ole tehty yksin, ja nyt on kiitosten vuoro. Työn tarkastaja professori Pauli Kolisoja Tampereen teknillisestä yliopistosta ja ohjaaja Marjo Ronkainen Ramboll Finland Oy:stä ovat antaneet arvokkaita neuvoja, näkökulmia ja palautetta työn aikana. Pentti Lahtinen Ramboll Finland Oy:stä on ideoinut työn aiheen, ja Harri Jyrävä Ramboll Finland Oy:stä on avustanut työn testausohjelman laatimisessa ja tulosten analysoinnissa. Tero Jokinen on tehnyt diplomityön vedenläpäisevyyسمääritykset ja antanut useita pikkakursseja niin laboratoriomääritysmenetelmistä kuin niiden taustalla olevasta teoriasta. Koko Ramboll Finland Oy:n Luopioisten yksikkö ja etenkin laboratorion väki ovat tarjonneet mukavan työilmapiirin, ja kollegani Noora K. on valaissut pitkiä työmatkojani seurallaan ja Oulun murteella annetulla vertaistuellan. Kiitos kaikille!

Lopuksi haluan kiittää Henriä ehtymättömästä tuesta ja konkreettisesta avusta, joita olen saanut diplomityön ja opintojeni aikana. Kiitokset myös Holvastin kotijoukoille tuesta ja sopivan suurpiirteisyyden opettamisesta.

Diplomityön valmistumisen myötä Tampereen teknillisellä yliopistolla vietetty aika lähestyy loppuaan. Töitä on saanut paiskia, mutta viimeisen viivan alla on arvokkaiden oppien lisäksi hienoja kokemuksia ja rakkaita ystäviä. Tästä on hyvä jatkaa eteenpäin.

Tampereella, 28.12.2015

Saara Hainari

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Massastabilointi maarakennusmenetelmänä	3
2.1	Menetelmän kuvaus	3
2.2	Massastabiloinnin käyttökohteet	6
2.3	Stabiloinnissa käytettävät sideaineet	9
2.4	Stabiloituvuustutkimukset ja sideainereseptointi	11
3	Stabiloinnin vaikutus maan ominaisuuksiin	13
3.1	Stabiloidussa maassa tapahtuvat reaktiot	13
3.1.1	Reaktioiden päätyypit sideaineittain	13
3.1.2	Sementtistabilointi	15
3.1.3	Kalkkistabilointi	17
3.1.4	Sementti-kalkki -stabilointi	19
3.1.5	Stabilointi piilevästi hydraulisella tai potsolaanisella materiaalilla	19
3.1.6	Kipsi sideaineseoksissa	21
3.2	Maan ominaisuuksien vaikutus stabiloituvuuteen	21
3.3	Stabiloidun maan luokitus- ja geotekniset ominaisuudet	24
3.3.1	Vesipitoisuus ja tilavuuspaino	24
3.3.2	Konsistenssirajat	27
3.3.3	Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet	32
3.3.4	Vedenläpäisevyys	38
4	Laboratoriotutkimukset	44
4.1	Laboratoriotutkimuksissa käytetyt runkoaineet	44
4.1.1	Savet ja lieju	44
4.1.2	Turpeet	49
4.2	Savien ja liejun pohjanvahvistustutkimusohjelma	50
4.2.1	Käytetyt sideainereseptit	50
4.2.2	Koekappaleiden valmistus	52
4.2.3	Puristuslujuuden määrittäminen	53
4.2.4	Kimmomoduulin E_{50} määrittäminen	55
4.2.5	Penetrometrimäärittäminen	57
4.2.6	Vesipitoisuuden ja tilavuuspainon määrittäminen	58
4.2.7	Konsistenssirajojen määrittäminen	59
4.2.8	Vedenläpäisevyyden määrittäminen	61
4.3	Turpeiden pohjanvahvistustutkimusohjelma	63
4.3.1	Käytetyt sideainereseptit	63
4.3.2	Koekappaleiden valmistus	64
4.3.3	Koekappaleiden esikuormitus	65
4.3.4	Puristuslujuuden määrittäminen	66
4.3.5	Kimmomoduulin E_{50} määrittäminen	66
4.3.6	Penetrometrimäärittäminen	67
4.3.7	Vesipitoisuuden ja tilavuuspainon määrittäminen	67

4.3.8	Vedenläpäisevyyden määrittäminen	67
4.4	Kiinteitetyn saven tutkimusohjelma.....	68
5	Laboratoriotutkimusten tulokset	69
5.1	Pohjanvahvistustutkimusohjelma.....	69
5.1.1	Vesipitoisuus ja tilavuuspaino	69
	Vesipitoisuus	69
	Tilavuuspaino.....	74
5.1.2	Konsistenssirajat	77
5.1.3	Yksiaksiaalinen puristuslujuus	84
5.1.4	Penetrometrimäärittäminen	87
5.1.5	Muodonmuutosominaisuudet.....	88
5.1.6	Turpeiden kokoonpuristuma	95
5.1.7	Vedenläpäisevyys	97
5.2	Kiinteitetyn saven tutkimusohjelma.....	97
6	Tutkimustulosten analysointi	105
6.1	Maan stabiloituvuudesta.....	105
6.2	Luokitusominaisuuksien tarkastelu	107
6.3	Lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien tarkastelu.....	109
6.4	Vedenläpäisevyysominaisuuksien tarkastelu	111
6.5	Stabiloidun maan tutkimusmenetelmistä	113
7	Johtopäätökset.....	114
	Lähteet.....	117

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	pinta-ala [cm^2]
c	koheesio [kPa]
E_{50}	puristuslujuuden puolikasta vastaava kimmomoduuli [kPa]
F	voima [N]
g	putoamiskiihtyvyys [m/s^2]
H	painekorkeus, vesipatsaan korkeus [m]
i	hydraulinen gradientti [m/m]
I_C	konsistenssiluku
I_L	juoksevuusindeksi
I_P	plastisuusluku
k	vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
$k_{20^\circ\text{C}}$	vedenläpäisevyyskerroin lämpötilassa 20 °C [m/s]
k_j	jousivakio [N/cm]
L	suotomatka [m]
m_w	märkämassa [g]
m_d	kuivamassa [g]
q_c	kärkivastus [N/cm^2]
q_u	puristuslujuus [kPa]
Q	näytteen läpi virrannut vesimäärä [m^3/s]
s_p	puristuskokeella määritetty leikkauslujuus [kPa]
s_{ur}	suljettu leikkauslujuus, häiritetty arvo [kPa]
s_u	suljettu leikkauslujuus, häiriintymätön arvo [kPa]
v	veden virtausnopeus [m/s]
V	maan tilavuus [cm^3]
w	vesipitoisuus [%]
w_L	juoksuraja [%]
w_P	plastisuusraja (kieritysraja) [%]
x	jousen kokoonpuristuma [cm]
$\varepsilon_{50\%}$	puristuslujuuden puolikasta vastaava suhteellinen muodonmuutos [%]
γ	maan tilavuuspaino [kN/m^3]
σ_1	pystysuuntainen pääjännitys [kPa]
σ_3	vaakasuuntainen pääjännitys [kPa]

1 JOHDANTO

Massastabilointi on maarakennusmenetelmä, jossa pehmeää maa-ainesta lujitetaan sekoittamalla sideainetta koko käsiteltävään maakerrokseen tai -massaan. Massastabilointia käytetään pohjanvahvistusmenetelmänä, jolloin pehmeä maakerros lujitetaan kantavaksi rakennuspohjaksi. Menetelmä soveltuu myös pehmeiden ylijäämämaiden kiinteyttämiseen sekä maa-ainesten ympäristöominaisuuksien parantamiseen. Stabiloimalla kiinteytettyjä ylijäämämassoja voidaan hyödyntää esimerkiksi täyttö- ja maisemointirakenteissa, jolloin läjitystarve ja hyvälaatuisten luonnonmateriaalien käyttötarve vähenevät. Kiinteytys parantaa tällaisten massojen käsiteltävyyttä ja maarakennusominaisuuksia kuten tiivistettävyyttä. Pilaantuneen maa-aineksen ja sedimenttien massastabilointi vähentää haitta-aineiden liukoisuutta ja kulkeutumista, jolloin maa-aineksen ympäristöominaisuudet paranevat.

Massastabilointi muuttaa maan geoteknisiä ominaisuuksia. Maan leikkauslujuus ja jäykkyys kasvavat, ja maakerrosten vedenläpäisevyys- sekä routivuusominaisuudet muuttuvat. Myös maan indeksiominaisuudet, kuten vesipitoisuus, tilavuuspaino sekä konsistenssi muuttuvat. Muutoksiin ja niiden suuruuteen vaikuttavat stabiloitavan maan ominaisuudet, sideaineresepti, sekoitustyö, lujittumisaika ja ulkoiset olosuhteet, kuten lämpötila, maan kuormitus sekä ympäröivän maan pohjaveden ominaisuudet.

Massastabiloidun maakerroksen mitoitusparametrit voidaan määrittää laboratoriokokeilla tai maastotutkimuksilla, mutta tutkimukset painottuvat usein lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Maan lujuudessa ja muodonmuutosominaisuuksissa tapahtuvat muutokset ovat vahvistetun pohjamaan geoteknisen suunnittelun kannalta oleelliset, mutta myös muut muutokset maan ominaisuuksissa on tärkeää tuntea. Stabiloidun maan käyttäytymiseen vaikuttavat lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien lisäksi muun muassa vesipitoisuus, konsistenssi sekä vedenläpäisevyys, joten pelkkiä lujuusominaisuuksia laajempi tarkastelu on tarpeen. Stabiloidun maan ominaisuudet ja käyttäytyminen tulee tuntea perinpohjaisesti, jotta stabiloidut massat ja rakenteet voidaan suunnitella teknisesti ja taloudellisesti erilaisiin kohteisiin yhä paremmin sopiviksi.

Stabiloidun maan indeksiominaisuudet kiinnostavat etenkin muualle kuljetettävien, häiriintyneiden massojen näkökulmasta. Maan vesipitoisuus, tilavuuspaino ja konsistenssi vaikuttavat maan käsiteltävyyteen ja hyötykäyttömahdollisuuksiin. Aina, kun massastabiloitua maata täytyy muokata tai tiivistää, on vesipitoisuuden ja konsistenssirajojen tuntemisesta hyötyä. Muutokset indeksiominaisuuksissa eri lujittumisaikojen jälkeen on

tärkeää tuntea myös stabiloidun maan laadunvalvonnassa, olipa kyse stabiloimalla tehtävästä pohjanvahvistuksesta, kiinteytyksestä tai maan ympäristöominaisuuksien parantamisesta. Stabiloidun maan vedenläpäisevyys tulee tuntea etenkin erilaisissa ympäristörakenteissa, mutta vedenläpäisevyys vaikuttaa myös maan konsolidoitumiskäyttäytymiseen sekä huokosvedenpaineen kehittymisen kautta suljetun tilan lujuuteen.

Työn tavoitteena on selvittää kokeellisesti ja kirjallisuuden avulla kuinka paljon ja mihin suuntaan stabiloitavan maan luokitus- ja geotekniset ominaisuudet muuttuvat stabiloidun maan hyötykäytön kannalta. Tutkimuksessa saadaan tietoa siitä, kuinka paljon käytettävän runkoaineen ominaisuudet, sideaineresepti sekä lujittumisaika vaikuttavat stabiloidun maan ominaisuuksiin. Työssä saadaan tietoa myös pitkäaikaislujittumisesta. Stabilointihankkeissa mitoittavana lujittumisaikana käytetään yleensä 28 - 90 vuorokautta. Stabiloidun maan lujuus ja muut ominaisuudet kehittyvät kuitenkin sideaineesta riippuen usein kuukausia ja jopa vuosia. Tämän vuoksi osa diplomityön laboratoriomäärityksistä tehdään 180 vuorokautta lujittuneille koekappaleille. Tutkimuksessa saadaan lisäksi tietoa olemassa olevien maan laboratoriotutkimusmenetelmien soveltuvuudesta massastabiloidun maan tutkimiseen.

Kirjallisuusselvityksessä esitellään massastabilointimenetelmä ja stabiloituvuustutkimusten perusteet sekä tutkitaan maan ja sideaineen välisiä reaktioita. Lisäksi käsitellään maan luokitus- ja kemiallisten ominaisuuksien sekä maan mineralogian vaikutusta stabiloituvuuteen. Työn kokeellisessa osuudessa tutkitaan kolmea savinäytettä, kahta turvenäytettä sekä savista liejunäytettä. Runkoaineista määritetään rakeisuus tai maatuneisuus, vesipitoisuus ja tilavuuspaino, vedenläpäisevyys sekä saven ja liejun osalta konsistenssirajat ja suljettu leikkauslujuus häirityssä tilassa ennen stabilointia. Turpeista määritetään kokoonpuristuma kuorman alla ennen stabilointia. Stabiloinnin jälkeen koekappaleista määritetään eri-ikäisinä yksiaksiaalinen puristuslujuus, kimmomoduuli E_{50} sekä rakeisuutta ja maatuneisuutta lukuun ottamatta samat ominaisuudet kuin ennen stabilointia. Koestettavien koekappaleiden ikä vaihtelee 7 ja 180 vuorokauden välillä. Koekappaleille tehdään myös penetrometrimääritys ja vedenläpäisevyyskokeita. Vertailemalla runkoaineiden alkuperäisiä ominaisuuksia stabiloinnin jälkeisiin ominaisuuksiin voidaan arvioida, kuinka maan käyttäytyminen on muuttunut stabiloinnin seurauksesta.

Laboratoriotestausohjelma on jaettu pohjanvahvistustutkimusohjelmaan ja kiinteytetyn saven tutkimusohjelmaan. Pohjanvahvistusohjelmassa sideainereseptit on valittu siten, että tavoitelujuustaso vastaa pohjanvahvistuskohteessa stabiloidulta maalta tyypillisesti edellytettävää lujuustasoa. Kiinteytetyn saven tutkimusohjelma simuloi tilannetta, jossa stabiloitu maa hyödynnetään esimerkiksi maastonmuotoiluissa, ja tavoiteltava leikkauslujuustaso on pieni. Runkoaineena käytetään pohjanvahvistusohjelmassakin käytettävää savea ja sideaineena pelkkää lentotuhkaa. Kiinteytetystä savesta määritetään samat ominaisuudet kuin pohjanvahvistusohjelman koekappaleista lukuun ottamatta vedenläpäisevyyttä.

2 MASSASTABILOINTI MAARAKENNUSMENETELMÄNÄ

2.1 Menetelmän kuvaus

Massastabilointi on maarakennusmenetelmä, jossa pehmeään maa-ainekseen sekoitetaan sideainetta mahdollisimman tasaisesti koko käsiteltävään kerrokseen tai maamassa. Massastabiloinnilla maan teknisiä ja ympäristöominaisuuksia muutetaan siten, että sen päälle voidaan rakentaa tai stabiloitua maata voidaan hyödyntää rakennus- tai täyttömateriaalina. Menetelmää käytetään saven, siltin, liejun, turpeen, ruoppausmassojen sekä muiden pehmeiden maa-ainesten lujittamiseen. Massastabiloinnilla tavoiteltavia ominaisuuksia ovat:

- maan leikkauslujuuden lisääntyminen
- maan deformaatio-ominaisuuksien parantuminen
- haitta-aineiden liukoisuuden väheneminen pilaantuneessa maassa
- maan vedenläpäisevyyden pienentyminen

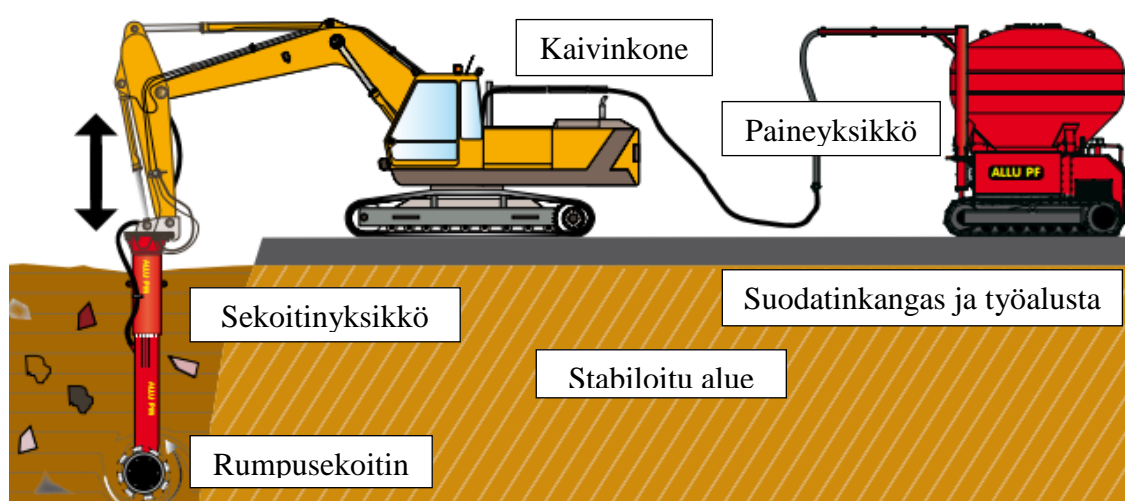
Massastabilointia voidaan käyttää pohjanvahvistusmenetelmänä, jolloin pehmeä maakerros lujitetaan kantavaksi rakennuspohjaksi. Maan leikkauslujuuden lisääntyminen parantaa maan stabiiliteettia ja kantavuutta. Deformaatio-ominaisuuksien parantuminen rajoittaa ja tasaa maakerroksessa syntyviä painumia. Lisäksi maan routivuutta voidaan vähentää massastabiloinnilla. (ALLU Finland Oy 2007; Forsman et al. 2014.)

Massastabilointi soveltuu myös maa-aineksen ympäristöominaisuuksien parantamiseen. Pilaantuneen maa-aineksen tai sedimenttien massastabilointi vähentää haitta-aineiden kulkeutumista pilaantuneesta maasta. Vaikutukset perustuvat kemiallisiin reaktioihin, jotka muuttavat haitta-aineita niukkaliukoiseen muotoon tai hajottavat haitta-aineita, sekä maan vedenläpäisevyyden pienenemiseen, jolloin haitta-aineet kapseloituvat stabiloituun maahan. Massastabilointia käytetään myös sulfidipitoisten maiden käsittelyyn. Stabilointi nostaa sulfidipitoisen maan pH:ta, jolloin sen kyky happamoittaa ympäristöä vähenee. (ALLU Finland Oy 2007; Forsman et al. 2014.)

Lisäksi massastabilointi soveltuu pehmeiden ylijäämämaiden kiinteyttämiseen. Kiinteytyksen avulla ylijäämämaiden käsiteltävyys ja maarakennusominaisuudet kuten tiivistettävyys ja kuljetettavuus paranevat. Kiinteytetty maa-aines voidaan hyödyntää sen sijaintipaikalla muun rakentamisen yhteydessä täyttömateriaalina eikä läjitystä tarvita. Kiin-

teytetty massa voidaan kuljettaa myös muualle hyötykäytettäväksi. Kiinteytyksen lujustavoite ja tarvittava sideainemäärä ovat usein pienempiä kuin pohjanvahvistuksessa. (ALLU Finland Oy 2007; Forsman et al. 2014.)

Massastabilointikalusto koostuu kaivinkoneesta ja sekoitinkärjestä sekä niihin yhteydessä olevasta yhdestä tai useammasta painesyöttimestä, jossa sideaineet ovat. Sekoitinyksikön kärjessä on pyörivä rumpusekoitin. Painesyöttimestä syötetään yhtä tai kahta sideainetta tai valmista sideaineseosta rumpusekoittimeen. Rumpusekoitin pyörii ja sekoittaa sideaineen maahan samalla, kun sekoitinyksikkö liikkuu maakerroksessa pysty- ja sivusuunnassa. (ALLU Finland Oy 2007; Forsman et al. 2014.) Massastabiloinnin toimintaperiaate ja kalusto on esitetty kuvassa 1.

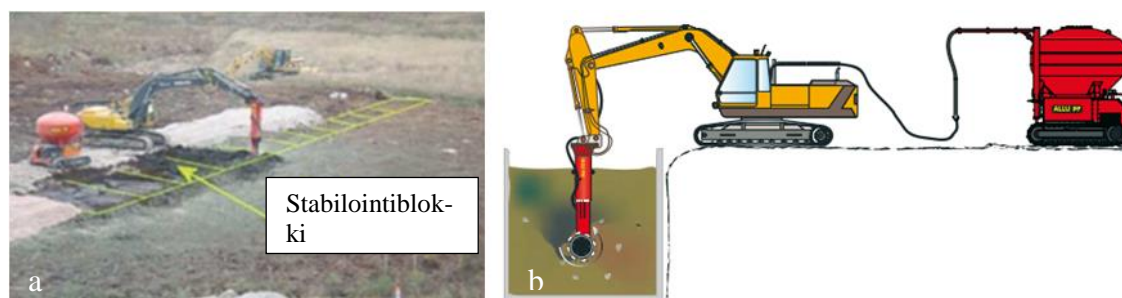


Kuva 1: Massastabilointikalusto ja toimintaperiaate (ALLU Finland Oy 2013, muokattu).

Stabilointisyvyyttä, syötetyn sideaineen ja sekoitustyön määrää yhtä stabilointiblokkia kohden seurataan työn aikana ohjaus- ja tiedonkeruujärjestelmällä. Näin varmistetaan stabiloinnin tasalaatuisuus. Sekoitustyötä tehdään koneen ulottuman verran, jonka jälkeen siirrytään seuraavaan stabilointiblokkiin. (Forsman et al. 2014.)

Nykyiset laitteistot mahdollistavat hyvissä olosuhteissa massastabiloinnin ulottamisen 7 - 8 m syvyyteen. Maksimisyvyys riippuu kuitenkin merkittävästi stabiloitavasta materiaalista ja stabiloitavan alueen olosuhteista. Tyypillisesti stabilointisyvyys on noin 3 - 5 m, mutta myös ohuempia kerroksia voidaan stabiloida. Sekoitustyön jälkeen stabiloidun maan päälle levitetään suodatinkangas. Suodatinkankaan päälle tehdään työalustatäyttö, joka toimii myös tiivistyspenkereenä. Työalustan päältä stabilointityötä voidaan jatkaa toisessa kohdassa. Stabiloidun maan päälle tehdään usein myös esikuormituspengeri. Etenkin stabiloidun turpeen päällä esikuormituspengeri on välttämätön, jotta stabiloitu turve tiivistyy riittävästi lujittumisen aikana. Massastabiloidun maan tavoitelujuus saavutetaan yleensä 1 - 3 kuukauden kuluttua stabiloinnista, joskin maa jatkaa lujittumistaan yleensä vielä tämän jälkeen. (Forsman et al. 2014.)

Kuvassa 2 on esitetty erilaisia massastabilointityön toteutustapoja.



Kuva 2: Massastabilointityön toteutustapoja: a) stabilointi blokeittain, b) stabilointi altaassa (ALLU Finland Oy 2007, muokattu).

Massastabilointi tehdään yleensä 3 - 5 * 3 - 5 m (x, y -taso) kokoisissa stabilointiruuduissa eli blokeissa (kuva 2 a). Stabilointisyvyys määräytyy kohteen olosuhteiden mukaan, ja sekoitinkärjen pituus määrittää maksimisyvyyden. Valmistuneen blokin jälkeen siirrytään seuraavaan blokkiin. Syötetyn sideaineen ja sekoitustyön määrää kontrolloidaan työn aikana. Blokeittain tehtävää stabilointia käytetään, kun stabiloitava massa on märkää ja pehmeää. (ALLU Finland Oy 2007.) Ennen stabilointia stabiloitavalta alueelta poistetaan stabilointityötä haittaavat esteet kuten kivet ja kannot. Lisäksi stabiloitava maa esihomogenisoidaan tarvittaessa ennen varsinaista stabilointia sekoitinkärjellä. (Forsman et al. 2014.)

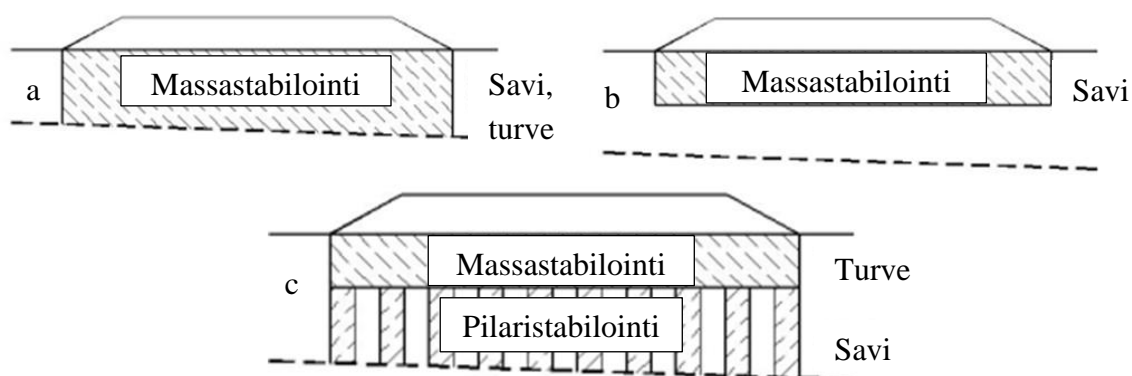
Stabilointi voidaan tehdä myös altaissa kuten kuvassa 2 b. Tällöin pehmeä massa läjitetään stabilointialtaaseen, jossa se stabiloidaan. Allas voi olla stabiloidun maa-aineksen lopullinen sijoituspaikka, tai lujittunut massa voidaan siirtää muualle. Etenkin ruoppausmassojen stabilointi toteutetaan usein näin. Menetelmä mahdollistaa myös pilaantuneiden maa-ainesten stabiloinnin eristettynä esimerkiksi vesistöistä. (ALLU Finland Oy 2007; Forsman et al. 2014.)

Massastabilointi voidaan jakaa stabilointiin *in situ* ja *ex situ*. *In situ* -stabilointi on alkuperäisellä sijaintipaikalla tehtävää stabilointia. *In situ* -stabilointia käytetään pohjanvahvistuksessa. Tällöin massastabiloidun kerroksen päälle usein rakennetaan. Stabilointi voidaan toteuttaa myös siten, että *in situ* -stabiloitu maa kaivetaan ylös vasta tietyn lujitusajan jälkeen, jonka jälkeen se hyödynnetään esimerkiksi täyttömateriaalina. *Ex situ* -stabiloinnissa stabiloidaan ylöskaivettua maata esimerkiksi aumassa tai stabilointialtaassa. *Ex situ* -stabiloitu maa-aines voidaan hyödyntää suoraan päällysrakenteilla täydennettynä esimerkiksi satamakenttänä. Lisäksi altaassa stabiloitu maa voidaan kaivaa ylös ja hyödyntää muualla esimerkiksi täyttömaana. (Forsman et al. 2014.)

2.2 Massastabiloinnin käyttökohteet

Massastabiloinnilla on useita geoteknisiä ja ympäristöteknisiä käyttökohteita. Massastabiloidun maan päälle ei voida suoraan perustaa rakennuksia, mutta menetelmällä on useita muita geoteknisiä sovelluskohteita. Massastabilointia käytetään teiden, katujen, rautateiden ja raittien pohjanvahvistuksessa. Menetelmällä voidaan myös parantaa näiden rakentamisessa syntyvien kaivumassojen laatua ja hyötykäyttömahdollisuuksia. Massastabilointi soveltuu myös laajojen alueiden, kuten piha- ja pysäköintialueiden, varasto- ja kenttäalueiden pohjanvahvistukseen sekä alue- ja esirakentamiseen. (Forsman et al. 2014.)

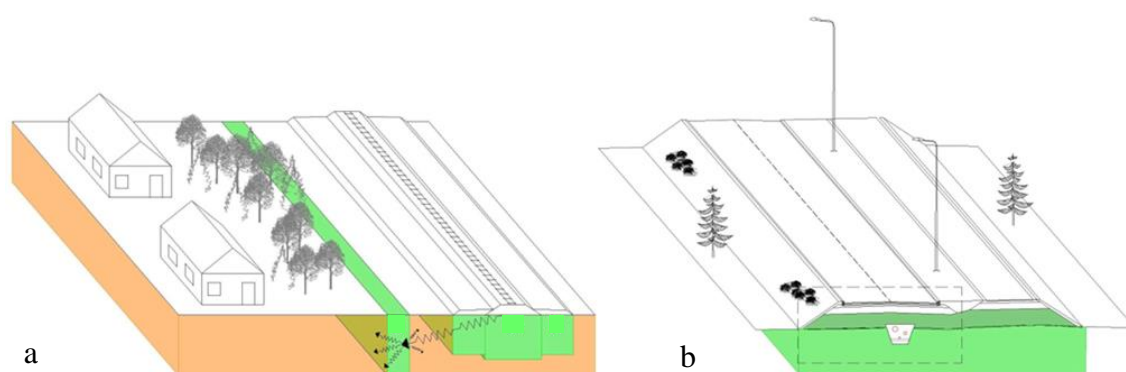
Pohjanvahvistuksessa stabilointi ulotetaan pehmeän kerroksen pohjaan kuten kuvassa 3 a tai määräsyvyyteen ns. kelluvana rakenteena kuten kuvassa 3 b. Lisäksi massastabilointi voidaan tehdä yhdistettynä pilaristabilointiin (kuva 3 c). Erotuksena pilaristabilointiin massastabiloinnilla käsitellään koko pehmeä maakerros tavoitesyvyyteen saakka.



Kuva 3: Massastabiloituja rakenteita: a) massastabilointi pehmeän kerroksen pohjaan, b) massastabilointi määräsyvyyteen, c) massastabilointi yhdistettynä pilaristabilointiin (Liikennevirasto 2010, muokattu).

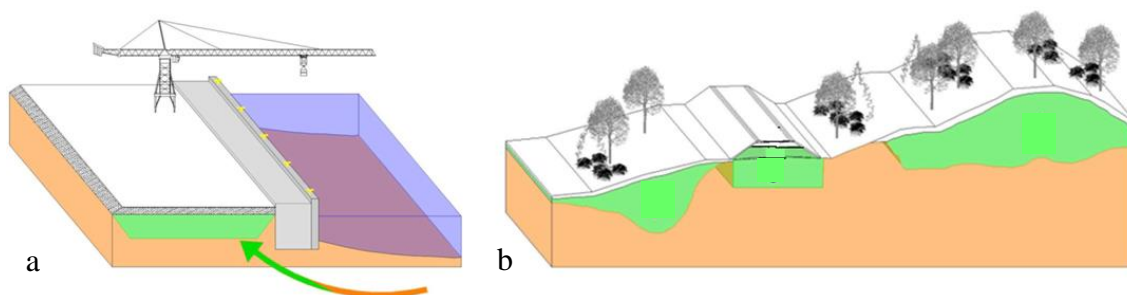
Pehmeän kerroksen alapintaan ulotettu massastabiloitu kerros on lähes painumaton esikuormituksen jälkeen. Kelluvassa rakenteessa massastabilointia ei tehdä pehmeän kerroksen pohjaan asti, ja tällöin kerroksen alle jää pehmeitä maamassoja. Rakenne siirtää kuormia alkuperäistä syvemmälle maahan ja tasaa painumaeroja. Rakenne ei kuitenkaan ole painumaton, mikäli sen alla on painuvia maakerroksia. Syntyvään painumaan vaikuttaa alapuolisen pehmeän maan esikonsolidaatiojännitys. Määräsyvyyteen ulotetun massastabiloinnin alle voidaan tehdä pilaristabilointi. Pilaristabilointi rajoittaa massastabiloidun kerroksen alapuolisten maakerrosten painumia ja parantaa varmuutta liukupintasortumaa vastaan. Massastabiloinnin ja pilaristabiloinnin yhdistelmää käytetään etenkin, jos stabiloitavan maan pintaosassa on pelkillä pilareilla huonosti lujittuvaa maata, kuten turvetta tai liejua. Rakennetta voidaan käyttää myös silloin, kun pilaristabilointikalustolle tarvitaan työalusta. (Forsman et al. 2014.)

Rautatieympäristössä massastabilointia voidaan käyttää uuden radan pohjamaan vahvistuksen lisäksi vanhan, pohjamaaltaan heikon ratapenkereen stabiliteetin parantamiseen (kuva 4 a). Ratapenkereen viereinen maa voidaan stabiloida, jolloin maa kestää vastapenkereen rakentamisen, ja radan stabiliteetti paranee. Kunnallistekniikassa massastabilointia voidaan käyttää putkijohtolinjojen painumien ehkäisyyn ja tasaamiseen vahvistamalla kaivannon pohjamaata, tai vähentää putkijohtokaivantojen tuennan tarvetta stabiloimalla maa ennen kaivua (kuva 4 b). Massastabiloitua maata on mahdollista käyttää myös kaivantojen täytöissä sekä katujen ja raittien päällysrakenteen alimmissa kerroksissa. (Forsman et al. 2014.) Kuvassa 4 on tyypillisiä geoteknisiä käyttökohteita rautatieympäristössä ja kunnallistekniikassa. Vihreät alueet symboloivat massastabiloituja kohtia.



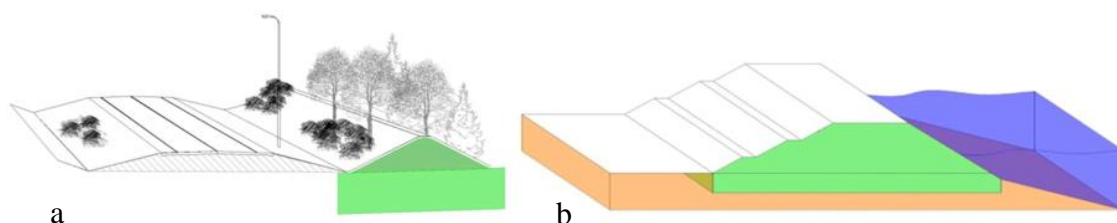
Kuva 4: Massastabiloinnin geoteknisiä käyttökohteita osa 1: a) massastabilointi radan alla ja sen vieressä, b) putkijohtokaivanto massastabiloinnilla lujitetussa pohjamaassa sekä massastabiloitu pengertäyttö ja jakava kerros (Forsman et al. 2014).

Satamarakenteissa voidaan hyödyntää massastabiloituja ruoppausmassoja, joita syntyy esimerkiksi meriväylien kunnostushankkeissa. Hyödyntämiskohteita ovat satamakenttien täytöt sekä kenttien päällysrakenteen alaosat (kuva 5 a). Lisäksi massastabiloitu maa soveltuu hyvin erilaisiin viher-, maisema- sekä ulkoliikuntarakenteisiin (kuva 5 b). Viher- ja maisemarakenteissa massastabiloitua maata voidaan hyödyntää täytöissä, maastonmuotoiluissa sekä vesialueiden tiivistysrakenteissa. Ulkoliikunta-alueilla massastabiloitu maa soveltuu esimerkiksi urheilukenttien täyttörakenteisiin. (Forsman et al. 2014.)

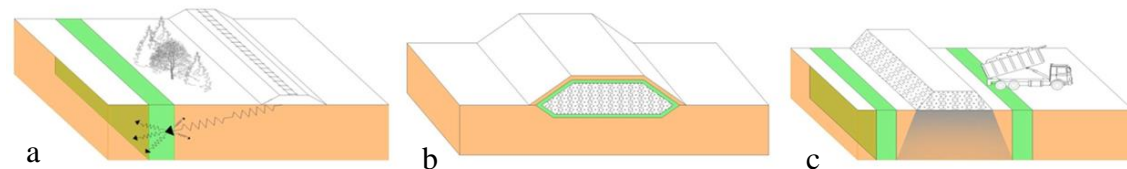


Kuva 5: Massastabiloinnin geoteknisiä käyttökohteita osa 2: a) stabiloitujen ruoppausmassojen hyödynnys satamakentän täytöissä, b) massastabiloitua maata viher- ja maisematäyttöissä sekä raitin alla ja rakennekerroksissa (Forsman et al. 2014, muokattu).

Menetelmän ympäristötekniisiä sovellutuksia ovat haitta-aineiden liukoisuuden vähentäminen pilaantuneesta maa-aineksesta, melu- ja tulvavallit tai -padot, värinänvaimennusrakenteet sekä kaatopaikkojen eristysrakenteet. Erilaisten vallien ja patojen pohjamaa voidaan myös vahvistaa ennen rakentamista massastabiloinnilla. Massastabiloidusta maasta voidaan tehdä myös pystyeristysseinä sen läpäisyominaisuuksien vuoksi esimerkiksi pilaantuneen maan kunnostusalueen ympärille. (Forsman et al. 2014.) Kuvissa 6 ja 7 on yllä esiteltyjä massastabiloinnin tyypillisiä ympäristötekniisiä käyttökohteita.



Kuva 6: Massastabiloinnin ympäristötekniisiä käyttökohteita osa 1: a) massastabiloidun maan päälle stabiloidusta maasta rakennettu meluvalli, b) stabiloidusta maasta rakennettu tulvapato massastabiloinnilla vahvistetun pohjamaan päällä (Forsman et al. 2014).



Kuva 7: Massastabiloinnin ympäristötekniisiä käyttökohteita osa 2: a) värinänvaimennusrakenne, b) kaatopaikan eristerakenteita, c) pystyeristys (Forsman et al. 2014).

Edellä kuvattujen käyttökohteiden lisäksi maarakennuskohteissa voidaan käyttää yhdistelmiä massastabiloinnin erilaisista sovellutuksista. Stabiloinnilla tavoiteltava lujuus määräytyy käyttökohteen mukaan. Yleisesti voidaan todeta, että lujuustavoite on suurin pohjanvahvistuksessa. Kiinteityksessä ja erilaisiin täyttöihin käytettävän

stabiloidun maan lujuustavoite on usein tätä pienempi. Lujuustavoitetta arvioitaessa tulee huomioida stabiloidun maan maarakennustekniset ominaisuudet kuten tiivistettävyyys ja muovailtavuus. Etenkin ex situ -stabiloidun maan tulee olla muokattavissa, jotta sen hyödyntäminen rakenteissa on mahdollista. Sen sijaan stabiloimalla vahvistettua pohjamaata täytyy harvoin muokata mahdollisia kaivantoja lukuunottamatta. (Forsman et al. 2014.)

Massastabiloidun rakenteen leikkauslujuustavoite on usein 30 - 70 kPa ja harvoin yli 100 kPa. Pohjanvahvistuskohteissa tavoitellaan usein 50 - 70 kPa leikkauslujuuksia. Kiinteytykseen tähtäävässä stabiloinnissa lujuustavoite on usein 20 - 30 kPa. Aika, jossa tavoitelujuus pyritään saavuttamaan, on kohdekohtainen. Usein tavoitelujuus halutaan saavuttaa 28 - 90 vuorokauden kuluessa stabiloinnista. (Jyrävä 2015.)

2.3 Stabiloinnissa käytettävät sideaineet

Yleisimmät massastabiloinnissa käytettävät kaupalliset sideaineet ovat sementti ja kalkki sekä näiden seokset. Lisäksi sideaineena voidaan käyttää erilaisia teollisuuden reaktiivisia sivutuotteita, kuten lentotuhkaa, kipsiä ja masuunikuonaa. Usein teollisuuden sivutuotteita käytetään seosaineena esimerkiksi sementin kanssa. (Forsman et al. 2014.)

Suomessa stabiloinneissa käytetyin sideaine on sementti. Sementti on hydraulinen sideaine, jonka lujittuminen perustuu hydrataatioreaktioon veden kanssa. Sementin alkulujittuminen on nopeampaa, mutta pitkäaikaislujittuminen sen sijaan vähäisempää kuin muilla sideaineilla. Sementti siis saavuttaa lujuutensa suhteellisen nopeasti. Sementillä lujitettu maa on lujaa, mutta haurasta. Massastabiloidun maan hauraus on harvoin ongelma, sillä stabiloitava rakenne on paksu ja laattamainen massa. Sementin ja maan reaktiotuotteena syntyvät kalsiumionit eivät juuri diffundoitu runkoaineessa. Tämän vuoksi sementtistabiloidun rakenteen homogeenisuus on hyvin riippuvainen sekoitus-työn tasalaatuisuudesta. (Forsman et al. 2014) Laboratorio-olosuhteissa sementillä saavutetaan helposti hyviä lujuuksia, mutta maastossa tehtävän sekoituksen epähomogeenisuuden vuoksi maastolujuudet jäävät selvästi alhaisemmiksi. (Liikennevirasto 2010.)

Stabiloinnin yhteydessä kalkista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä poltettua kalkkia (CaO). Kalkki on potsolaaninen materiaali, jonka lujittumisreaktiot perustuvat pääasiassa potsolaanireaktioihin. Kalkin alkulujittuminen on hitaampaa kuin sementin, mutta kalkkistabiloidussa maassa tapahtuu merkittävästi pitkäaikaisreaktioita. Lujittumista voi tapahtua jopa vuosia stabiloinnin jälkeen. Kalkki on hyvin reaktiivinen sideaine, joka sitoo tehokkaasti reaktioissaan vettä. Kalkin reaktiot tuottavat paljon lämpöenergiaa, joka edistää lujittumisreaktioita. Kalkkistabiloitu maa on näennäisesti alkuperäistä karkeampaa, sillä maarakeet järjestäytyvät uudelleen. Kalkkistabiloidun maan ionikoostumus on erilainen kuin sementtistabiloidussa maassa, ja kalkki pystyy diffundoitumaan runkoaineessa. Diffuntoituminen siirtää kalsiumioneja myös sekoittumattomaan maahan

ja tasaa epätasaista sekoitustyötä. Tämän vuoksi kalkkistabilointi ei ole yhtä riippuvaista sekoitustyön tasalaatuisuudesta kuin sementtistabilointi. (Forsman et al. 2014.) Pelkkää kalkkia käytetään nykyään vain vähän melko alhaiseksi jäävän lujuuden vuoksi. Lisäksi kalkki lujittaa huonosti humuspitoisia maa-aineksia. (Liikennevirasto 2010.)

Kalkin ja sementin seos on yleisin stabiloinnissa nykyään käytetty sideaine. Seoksella saavutetaan parempi lujuus kuin pelkällä kalkilla, ja sideaine lujittaa hyvin myös humuspitoisia maa-aineksia. Kalkin läsnä ollessa myös sideaineen diffuusiivisuus runko-aineessa paranee. Sementin, sammutetun kalkin (Ca(OH)_2) ja kipsin seosta käytetään nykyään melko yleisesti stabiloinnissa, ja sideaineseosta on saatavana myös kaupallisena tuotteena. Tämä sideaineseos lujittaa usein hyvin myös orgaanista ainesta sisältäviä savia. (Liikennevirasto 2010.)

Massastabiloinnissa tyypillisesti sideaineena käytettäviä teollisuuden sivutuotteita ovat erilaiset tuhkat, kuonat ja kipsi. Sivutuotteiden käytöllä pyritään vaikuttamaan stabiloidun maan ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, sekä sideainekustannuksiin. Sivutuotteiden käyttö pienentää usein kokonaissideainekustannuksia, sillä ne ovat kaupallisia sideaineita huomattavasti edullisempia. Teollisuuden sivutuotteet ovat tyypillisesti vähemmän reaktiivisia kuin kaupalliset sideaineet. Niiden lujittava vaikutus on usein hyvin hidas tai lujittumisreaktiot vaativat aktivoivan aineen käynnistykseen. Tämän vuoksi sivutuotteita käytetään usein yhdessä kaupallisten sideaineiden kanssa. Sementti ja kalkki toimivat tällöin lujittumisreaktioiden käynnistäjinä. (Forsman et al. 2014.)

Lentotuhka on kivihiilen, turpeen tai biopolttoaineiden poltossa voimalaitosten savukaasuista erotettu sivutuote. Lentotuhka vastaa rakeisuudeltaan silttiä ja on hieman sementtiä karkearakeisempaa. Lentotuhkan lujittava vaikutus perustuu potsolaanireaktioihin. Masuunikuona on piilevästi hydraulinen materiaali, jota syntyy raudanvalmistuksen sivutuotteena. Sideaineena käytettävä masuunikuona granuloidaan ja jauhetaan ennen käyttöä. Granulointi muuttaa kuonan olomuodoltaan lasimaiseksi ja huokoiseksi, mikä lisää kuonan reaktiivisuutta. Samoin jauhatus parantaa masuunikuonan reaktiivisuutta. Masuunikuona vaatii aktivoivan materiaalin, kuten sementin, läsnäoloa lujittumisreaktioiden käynnistämiseksi ja niiden kiihdyttämiseksi. Myös kipsiä syntyy kivihiilen poltossa rikinpoiston lopputuotteena. Kipsin lujittava vaikutus perustuu lujan reaktiotuotteen, ettringiitin muodostumiseen. Teollisuuden sivutuotteiden reaktiivisuus ja lujittamiskyky voivat vaihdella merkittävästi sivutuoteryhmän sisällä. Esimerkiksi lentotuhkia syntyy monenlaisissa polttoprosesseissa, ja esimerkiksi polttoaineet näissä prosesseissa vaihtelevat. (EuroSoilStab 2002.) Varsinaisten sideaineiden lisäksi stabiloinnissa voidaan käyttää erilaisia lisäaineita, joiden pääasiallinen tarkoitus on lisätä kiinteiden partikkelien määrää maassa. Esimerkiksi hiekkaa voidaan käyttää tähän käyttötarkoitukseen.

Kaupallisten sideaineiden, kuten sementin ja kalkin vaatimuksenmukaisuus eli materiaalin ominaisuuksien varmennus osoitetaan CE-merkinnällä. Muiden sideainekomponenttien ja seossideaineen vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa sideaineen tuottajan dokumenteilla tai rakennuspaikkakohtaisesti tehtävillä kokeilla. (Liikennevirasto 2010.) Masuunikuona tulkitaan tuotteeksi, ja sitä voidaan käyttää sideaineena edellä mainitulla menettelyllä. Jätteiksi luokiteltavat ja tuotteistamattomat sivutuotteet, kuten lentotuhka, vaativat sivutuotteesta ja rakennuspaikasta riippuen ympäristöluvan tai ympäristöilmoituksen. (Tiehallinto 2007.)

2.4 Stabiloituvuustutkimukset ja sideainereseptointi

Stabiloituvuustutkimuksilla selvitetään teknisesti ja taloudellisesti kohteeseen parhaiten sopiva stabiloinnin toteutustapa. Tutkimuksissa selvitetään erilaisten sideainereseptien soveltuvuutta kohteeseen, ja niissä saadaan tietoa myös tarvittavasta lujittumisajasta sekä kohteeseen parhaiten soveltuvasta toteutustavasta. Stabiloituvuustutkimuksissa voidaan esimerkiksi arvioida tietyn maakerroksen lujittumista sellaisenaan tai alapuolisen maakerroksen kanssa sekoitettuna. (ALLU Finland Oy 2007; Forsman et al. 2014.)

Massastabilointia suunniteltaessa tavoitellaan tiettyä lujuustasoa sekä mahdollisesti muita ominaisuuksia, kuten maan tiivistettävyyden parantumista. Joissakin tapauksissa vaaditaan nopeasti korkeaa lujuutta, ja joissakin tapauksissa lujittumisen täytyy olla hidasta, jotta maata voidaan muokata stabiloinnin jälkeen. Sideaineresepti räätälöidään stabiloituvuustutkimuksissa kohteeseen sopivaksi. Valittavaan sideainereseptiin vaikuttavat tavoiteltavien teknisten ominaisuuksien lisäksi sideainekustannukset. Sideainekustannukset ovat tyypillisesti noin 50 - 70 % massastabiloinnin kokonaiskustannuksista. Tämän vuoksi esimerkiksi erilaisten sivutuotteiden soveltuvuus kohteeseen kannattaa usein selvittää. (Forsman et al. 2014.)

Ennen stabiloituvuustestausta kohteen maakerrosrajat, kerrosten luokitusominaisuudet, lujuus- ja painumaominaisuudet sekä pohja- tai orsivedenpinta tulee tuntee. Stabiloitavasta kohteesta otetaan näytteitä, jotka edustavat kattavasti stabiloitavia maakerroksia. Näytteenottopisteet valitaan pohjatutkimusten perusteella siten, että niistä saatavat näytteet edustavat kohteen kannalta tärkeimpiä tai pohjaolosuhteiltaan haastavimpia kohtia. Näytteille tehdään laboratoriossa luokitusominaisuuksien määrittäksiä, jotta kohteen maakerroksissa vallitsevat olosuhteet tunnetaan. Tarvittaessa tehdään myös kemiallisia määrittäksiä, kuten pH-määrittäksiä ja rikkipitoisuuden määrittäksiä. (EuroSoilStab 2002; Forsman et al. 2014)

Tulosten perusteella valitaan alustavat sideaineet ja sideainemäärät, joilla maan stabiloituvuutta testataan laboratoriossa. Alustavien stabiloituvuusmäärittäysten jälkeen tehdään usein lisää stabiloituvuuskokeita, kun ensimmäisten sideainereseptien toimivuus on arvioitu. Varsinaisessa stabiloituvuustutkimusohjelmassa on usein ensimmäistä vaihetta

enemmän eri sideainetyyppejä ja -määriä. Tässä vaiheessa selvitetään kohteeseen parhaiten soveltuva sideaineresepti, eli käytettävän sideaineen tyyppi ja määrä. Kohteessa käytettäviä sideainereseptejä voi olla useita, mikäli pohjaolosuhteet ja stabiloituvuus vaihtelevat merkittävästi kohteen sisällä. Näin voidaan optimoida stabiloinnilla saavutettavia teknisiä ominaisuuksia sekä kustannuksia. (EuroSoilStab 2002.)

Stabiloituvuustutkimuksissa stabiloituvuutta mitataan ensisijaisesti yksiaksiaalisella puristuskokeella, jonka avulla stabiloidun maan puristuslujuus, suuntaa-antava leikkauslujuus sekä muodonmuutosominaisuudet (kimmomoduuli E_{50}) määritetään. Alueen geotekninen suunnittelu toteutetaan stabiloituvuustutkimusten jälkeen. Geoteknistä suunnittelua varten stabiloidun maan lujuusparametrit ja muodonmuutosominaisuudet voidaan tarvittaessa määrittää kolmiaksiaalikokeilla. Myös ödometrikokeita, vedenläpäisevyysmäärittämiä sekä liukoisuuskokeita voidaan tehdä. (Liikennevirasto 2010.)

Maastossa saavutettava stabiloidun rakenteen lujuus on usein pienempi kuin laboratoriossa saavutettava lujuus. Laboratorio-oloissa sekoitustyön jälki on usein homogeenisempaa kuin maastossa. Stabiloitu massa saattaa myös tiivistyä maastossa huonommin kuin laboratoriossa. (ALLU Finland Oy 2007.) Liikenneviraston syvästabilointiohjeessa (2010) on annettu laboratoriolujuuksille korjauskertoimia. Kertoimet eivät ulotu massastabiloitujen rakenteiden tyypilliselle leikkauslujuustasolle. Laboratorio-olosuhteissa saavutettava puristuslujuus on kokemuseräisesti karkeasti 30 % suurempi kuin maastossa saavutettava lujuus. Lujuuksien välinen korrelaatio on kuitenkin hyvin tapauskohtainen. (Jyrävä 2015.)

3 STABILOINNIN VAIKUTUS MAAN OMINAISUUKSIIN

Stabiloidun maan ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät voidaan karkeasti jakaa seuraavasti: (1) sideaineen ominaisuudet, (2) stabiloitavan maan ominaisuudet, (3) sekoitusolosuhteet sekä (4) lujittumisolosuhteet (Kitazume & Terashi 2013). Edellä mainitut tekijät on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Stabiloidun maan ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä (Kitazume & Terashi 2013).

Sideaineen ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> - Sideainetyyppi - Sideaineen laatu ja määrä - Maan ja sideaineen seokseen lisättävät muut materiaalit, kuten lisäaineet
Maan ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> - Vesipitoisuus - Maan kemiallinen, fysikaalinen ja mineraloginen koostumus - Orgaanisen aineksen määrä ja laatu - Huokosveden pH
Stabilointityön olosuhteet	<ul style="list-style-type: none"> - Laboratorio-olosuhteet / maasto-olosuhteet - Stabilointityön homogeenisuus
Lujittumisolosuhteet	<ul style="list-style-type: none"> - Lämpötila - Lujittumisaika - Jäätymis- ja sulamisrasitukset - Tiivistäminen ja esikuormitus

Alaluvussa 3.1 käsitellään erilaisia maassa tapahtuvia sideainereaktioita sideainetyypeittäin. Maan ominaisuuksien vaikutusta stabiloituvuuteen käsitellään alaluvuissa 3.2 ja 3.3. Stabilointi- ja lujittumisolosuhteita sivutaan alaluvuissa 2.4 ja 3.1.

3.1 Stabiloidussa maassa tapahtuvat reaktiot

3.1.1 Reaktioiden päätyypit sideaineittain

Stabiloidussa maassa tapahtuvat sideainereaktiot on tärkeää tuntea valittaessa stabiloinnissa käytettävää sideainetta sekä arvioitaessa reaktioiden vaikutuksia maahan. Stabilointi aiheuttaa maassa kemiallisia ja fysikaalisia reaktioita, jotka lisäävät maan lujuutta. Portland-sementti, kalkki, potsolaaniset materiaalit (esim. masuunikuona) ja piilevästi

hydrauliset materiaalit (esim. lentotuhka) sekä kipsi muodostavat veden ja maan kanssa tietyissä olosuhteissa lujia reaktiotuotteita. Maan huokostila täyttyy näistä reaktiotuotteista, jolloin maan lujuus kasvaa. (Janz & Johansson 2002; Åhnberg 2006.) Reaktiotuotteiden määrä korreloi saavutettavan lujuuden kanssa (Åhnberg 2006). Sideainereaktiot vaihtelevat reaktiotuotteiltaan ja -prosessiltaan sekä intensiteetiltään ja nopeudeltaan. Sementin, kalkin, potsolaanisten ja piilevästi hydraulisten sideaineiden reaktiotuotteet ovat kuitenkin kaikki samankaltaisia koostuen pääasiassa kalsium- ja piiyhdisteistä. Lisäksi reaktiotuotteet sisältävät jonkin verran alumiini- ja rautayhdisteitä. (Janz & Johansson 2002.) Taulukossa 2 on esitetty sideaineittain tapahtuvat tärkeimmät reaktiot ja reaktioissa reagoivat aineet.

Taulukko 2: Tavallisimpien sideaineiden pääreaktiot ja reaktioissa reagoivat osapuolet (Janz & Johansson, 2002.)

Sideaine	Reaktio	Reagoivat aineet
Sementti	Hydrataatio	Vesi
Kalkki	Potsolaaninen	Vesi + potsolaaniset savimineraalit
Masuunikuona	Hydrataatio	Vesi + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (esim. sementistä)
Lentotuhka	Potsolaaninen	Vesi + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (esim. sementistä)
Kipsi	Ettringiitin muodostus	Vesi + saven mineraalit

Maan lujuutta lisäävät sideainereaktiot ovat (1) sementin ja maan sisältämän veden välinen hydrataatioreaktio, (2) potsolaaniset reaktiot, joissa kalkin tai sementin muodostama kalsiumhydroksidi ja maan potsolaaniset mineraalit reagoivat keskenään sekä (3) ioninvaihtoreaktiot, jotka tapahtuvat kalkin tai sementin muodostaman kalsiumhydroksidin ja maan ionien välillä. Potsolaaninen reaktio voi tapahtua myös reaktioon lisätyn tai jonkun toisen reaktion tuottaman kalsiumhydroksidin ja potsolaanisen materiaalin välillä. Oma lujuutta lisäävä reaktiotyyppinsä on kipsin ettringiitin muodostus sen reagoiessa veden ja saven mineraalien kanssa (4). Myös sideaineiden vettä sitova vaikutus lisää hetkellisesti maan lujuutta, mutta vaikutus katoaa, kun maa on kosketuksissa veden kanssa. (Janz & Johansson 2002; Little & Nair 2009.)

Taulukossa 2 esitettyjen reaktioiden lisäksi maan ja tietyn sideaineen välillä tapahtuu myös muita lujittavia reaktioita. Sementtistabiloinnin lujittava vaikutus perustuu pääasiassa sementin ja maan huokosveden väliseen hydrataatioreaktioon. Merkittävin lujittuva reaktiotuote on hydrataatioreaktiossa syntyvä kalsiumsilikaattihydraatti, CSH. Sementtistabiloinnissa maassa tapahtuu myös jonkin verran potsolaani- ja ioninvaihtoreaktioita, mutta niiden lujittava vaikutus on hydrataatioreaktiota pienempi. Kalkkistabiloinnin lujuutta lisäävä vaikutus perustuu pääasiassa potsolaanireaktioihin. Potsolaanireaktioiden lujittuvia reaktiotuotteita ovat kalsiumsilikaattihydraatti (CSH) ja kalsiumalumiinaattisilikaattihydraatti (CASH). Kalkin ja veden välinen hydrataatio tuottaa runsaasti lämpöä, joka edistää potsolaanisia reaktioita. Kalkin ja maan välillä tapahtuu myös io-

ninvaihtoreaktioita, ja niiden vaikutus on sementtistabilointia suurempi. (Janz & Johansson 2002.)

Potsolaanisten tai piilevästi hydraulisten sideaineiden lujitusreaktiot ja reaktiotuotteet ovat samankaltaisia kuin yllä kuvatut, mutta ne vaativat aktivoivan ainesosan, kuten kalsiumhydroksidin, läsnäoloa. Kipsi muodostaa veden ja savimineraalien kanssa reagoidessaan lujaa ettringiittiä. Ettringiitti on muodoltaan neulamainen reaktiotuote, joka täyttää savipartikkelien välit. Kaikkien sideaineiden reaktiivisuus on riippuvainen niiden ominaispinta-alasta. Pieni partikkelikoko lisää ominaispinta-alaa ja reaktiivisuutta (Janz & Johansson 2002).

3.1.2 Sementtistabilointi

Sementti muodostaa välittömästi veden kanssa reagoidessaan kalsiumhydroksidia $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Samalla seoksen pH kasvaa. Stabiloitumisen kannalta sementin tärkeimmät reaktiiviset klinkkerimineraalit ovat trikalsiumsilikaatti ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, lyhenne C_3S) ja dikalsiumsilikaatti ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, lyhenne C_2S) (Åhnberg et al. 1995). Nämä mineraalit reagoivat veden kanssa muodostaen lujittuvaa kalsiumsilikaattihydraattia (lyhenne CSH), joka on pääasiallinen sementin ja maan reaktioissa syntyvä lujittuva reaktiotuote. Tämä on esitetty yksinkertaistetusti reaktioyhtälössä 1. (Janz & Johansson 2002.)



H_2O	vesi
CSH	kalsiumsilikaattihydraatti
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	kalsiumhydroksidi.

Sementin reaktiotuotteet muodostavat lujittuvan sementtigeelin. Muita sementin ja veden reaktioissa syntyviä reaktiotuotteita ovat ettringiitti ja monosulfaatti. Ettringiittiä ja monosulfaattia muodostuu klinkkerimineraali trikalsiumaluminaatin ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, lyhenne C_3A) reaktiossa. Lisäksi ettringiitin kaltaisia reaktiotuotteita syntyy klinkkerimineraali tetrakalsiumaluminaattiferriitin ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, lyhenne C_4AF) hydratoitumisessa. Ettringiittiä syntyy, kun sementin sisältämä sulfaattipitoinen kipsi reagoi trikalsiumaluminaatin kanssa. Sen muodostuminen estää trikalsiumaluminaatin liian nopean hydratoitumisen ja lujittumisen. (Janz & Johansson 2002.)

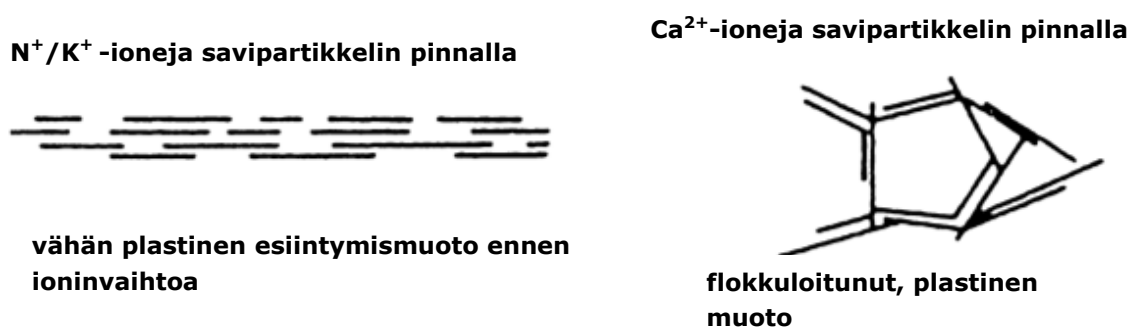
Ettringiitti pysyy stabiilina vain sulfaatin läsnä ollessa, ja muuttuu monosulfaatiksi sulfaattipitoisuuden laskiessa reaktion etenemisen yhteydessä. Jos monosulfaatti altistuu myöhemmin sulfaatti-ioneille, muodostuu ettringiittiä jälleen. Ettringiitti on rakenteeltaan monosulfaattia huomattavasti löyhempää. Ettringiitin uudelleenmuodostuminen aiheuttaa reaktiotuotteiden paisumista, mikä voi aiheuttaa halkeamia kovettuneessa be-

tonissa. Maassa on paljon huokosia, jotka sallivat reaktiotuotteiden laajenemisen, eikä paisumisesta yleensä aiheudu ongelmia stabiloinnissa. (Janz & Johansson, 2002.)

Kalsiumhydroksidi osallistuu maassa tapahtuviin ioninvaihtoreaktioihin, joiden seurauksesta savipartikkelit järjestäytyvät uudelleen aiheuttaen alkuperäistä karkeamman olomuodon (flokkuloituminen). Ioninvaihto tapahtuu kalsiumionien ja savipartikkelien pinnalla olevien positiivisten ionien, usein natrium- ja kaliumionien, välillä. (Janz & Johansson, 2002.)

Savi koostuu pääasiassa litteistä alumiinisilikaateista, joiden välissä on ohuita vesikerroksia. Savipartikkelin pinta on negatiivisesti varautunut. Vesiliuoksessa saven pinta vetää puoleensa positiivisesti varautuneita ioneja. Tämä aiheuttaa gradienttieron saven pinnan ja liuoksen välille. Gradienttieron vuoksi saven pinnalta siirtyy kationeja takaisin liuokseen. Tätä vyöhykettä kutsutaan diffuusiovyöhykkeeksi. Ionien siirtyminen savimineraalin pinnalle ja siitä pois on tasapainotilassa, jossa kationien konsentraatio on suurin savimineraalin lähellä. Konsentraatio pienenee etäisyyden kasvaessa. Tällaista rakennetta kutsutaan sähköiseksi kaksoiskerrokseksi (nk. double layer -rakenne). Kerrokset muodostuvat negatiivisesti varautuneesta savipartikkelin pinnasta ja positiivisesti varautuneesta diffuusiovyöhykkeestä savipartikkelin vieressä. (Eslinger & Pevear 1988.)

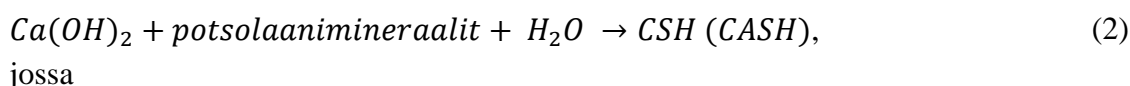
Savisen maan Ca^{2+} -ionipitoisuus kasvaa stabiloitaessa, ja ionit muuttavat saven rakennetta. Kalsiumionit muuttavat savipartikkeleja ympäröivää varausta, jolloin partikkelit asettuvat uudella tavalla eli flokkuloituvat. Maan raekokojakautuma muuttuu näennäisesti alkuperäistä karkeammaksi. (Åhnberg et al. 1995; Janz & Johansson 2002.) Kuvassa 8 on esitetty savipartikkeleiden uudelleenjärjestäytyminen ioninvaihdossa.



Kuva 8: Savipartikkelien uudelleenjärjestäytyminen (flokkulaatio) illiitillä ja kaoliniitilla (Müller-Vonmoos 1983, muokattu).

Ioninvaihdon merkitys on sementtistabiloinnissa kuitenkin vähäinen sementin hydrataatioreaktion aiheuttaman ionikoostumuksen vuoksi (Åhnberg et al. 1995; Janz & Johansson 2002).

Sementti muodostaa vähäisessä määrin myös potsolaanisia reaktiotuotteita. Hydrataatio-reaktion jälkeen alkavat hitaat potsolaaniset reaktiot tapahtuvat kalsiumhydroksidin ja maan sisältämien pii- ja alumiinipitoisten potsolaanimineraalien välillä. Savet ja siltit sisältävät yleensä kalium- ja piipitoisia mineraaleja. Osa näistä mineraaleista on potsolaanisia, eli ne voivat reagoida kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen lujaa reaktiotuotetta, kalsiumsilikaattihydraattia (CSH). Jos maa sisältää runsaasti alumiinipitoisia mineraaleja, syntyy reaktiotuotteena kalsiumsilikaattihydraatin sijasta kalsiumalumiinaattisilikaattihydraattia (CASH), joka myös lisää lujuutta. (Janz & Johansson 2002; Åhnberg 2006.) Reaktioyhtälössä 2 on esitetty periaatteellisesti potsolaaninen reaktio.



$Ca(OH)_2$	kalsiumhydroksidi
H_2O	vesi
CSH	kalsiumsilikaattihydraatti
$CASH$	kalsiumalumiinaattisilikaattihydraatti

Potsolaanireaktiot vaativat korkean pH:n aktivoituakseen. Sementin hydrataatio nostaa pH:n riittävän korkeaksi potsolaanireaktioiden käynnistymiseksi. Myös lämpötila vaikuttaa sementin reagointiin ja lujittumisnopeuteen. Sementin hydrataatio tuottaa lämpöä, joka edistää hydrataatiota seuraavia potsolaanireaktioita. (Janz & Johansson 2002.)

Sementin reaktiot ovat nopeita: noin puolet sementistä on reagoinut 3 päivän kuluttua sideaineen sekoituksesta, 60 % 7 päivän kuluttua ja noin 90 % 3 kuukauden sisällä stabiloinnista. Sementin reaktiotuotteet syntyvät pääasiassa sementtipartikkelien pinnalla. Reaktiotuotteet eivät leviä ympäröivään maahan, toisin kuin kalkilla. Reaktiotuotteet lujittavat pääasiassa sen kohdan maasta, johon ne sekoittuvat, eivätkä ne leviä sekoituskohdan ympärille. Tämän vuoksi sementtistabiloitu maa on erityisen herkkää sekoitus-työn epähomogeenisuudelle. (Janz & Johansson 2002.)

3.1.3 Kalkkistabilointi

Kalkki (poltettu kalkki, CaO) muodostaa maan huokosveden kanssa reagoidessaan nopeasti kalsiumhydroksidia hydrataatioreaktiossa (kaava 3).

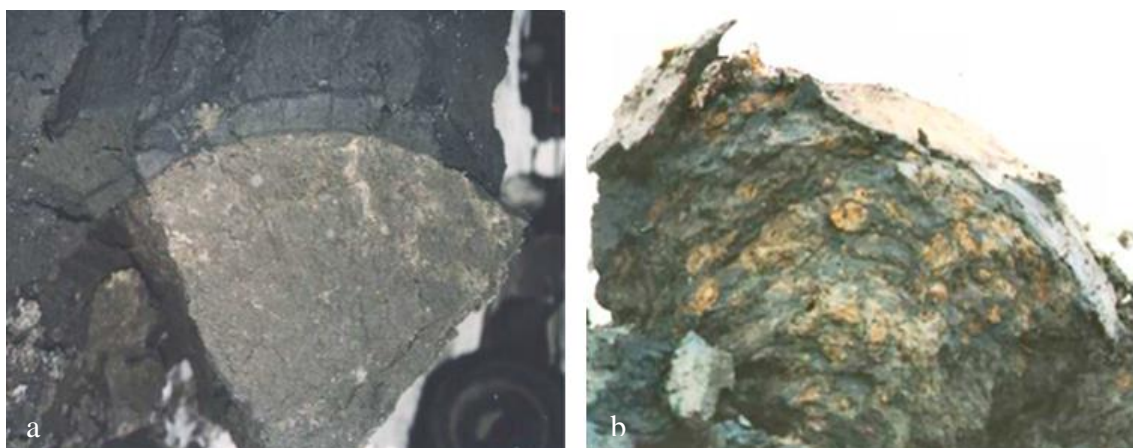


CaO	kalsiumoksidi
H_2O	vesi
$Ca(OH)_2$	kalsiumhydroksidi.

Kalsiumhydroksidi ei lisää maan lujuutta, mutta sen syntyminen kuluttaa vettä ja pienentää maan vesipitoisuutta. Myös lämpötila kasvaa merkittävästi. Alkuperäistä pienempi vesipitoisuus aiheuttaa näennäistä lujuuden kasvua maassa, mutta vaikutus katoaa, kun maa on kosketuksissa veden kanssa. Kalsiumhydroksidi nostaa pH:ta noin arvoon 12,5. Kalsiumhydroksidin muodostumista seuraavat potsolaanireaktiot vaativat korkean pH:n toimiakseen tehokkaasti. (Janz & Johansson 2002.) Mikäli pH ei kasva riittävän korkeaksi, tapahtuu maassa vain flokkuloitumista ilman lujuutta lisääviä potsolaanireaktioita (Locat et al. 1996).

Varsinaiset lujuutta lisäävät reaktiotuotteet syntyvät potsolaanireaktioissa, jotka tapahtuvat maan sisältämien pii- ja alumiiniyhdisteiden sekä kalsiumhydroksidin välillä. Hydrataatiossa syntynyt lämpö edistää potsolaanisia reaktioita. Lisäksi lujittuvia reaktiotuotteita syntyy ioninvaihtoreaktioissa. Ioninvaihtoreaktiot tapahtuvat kuten sementtistabiloinnissa, mutta kalkin kyky aiheuttaa näitä reaktioita on huomattavasti parempi kuin sementin. Tämän vuoksi ioninvaihtoreaktio kasvattaa kalkkistabiloinnissa enemmän lujuutta, ja maan olomuoto muuttuu enemmän kuin sementtistabiloidussa maassa. Potsolaanireaktiot ovat hyvin riippuvaisia lämpötilasta. Kun lämpötila palaa reaktioiden jälkeen normaaliksi, lujittuminen lakkaa. Tähän voi kuitenkin mennä hyvin kauan, sillä lämpöä vapautuu kalkin sammumisessa hyvin runsaasti. (Janz & Johansson 2002.)

Kalkin reaktioissa syntyvä $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kykenee diffuntoitumaan ympäröivään, stabiloimattomaan maahan. Kuvassa 9 a on esitetty kalkilla ja kipsillä stabiloitu pilari ja kuvassa 9 b sementillä ja kuonalla stabiloitu, maasta ylöskaivettu pilari. Kuvassa 9 a havaitaan selkeä tumma diffuntoitumisvyöhyke, kun kuvan 9b pilarissa tällaista ei ole havaittavissa. Kalkkistabiloidun maan lujittuminen ei diffuntoitumiskykynsä vuoksi yhtä herkkä sekoitustyon epähomogeenisuudelle kuin sementtistabiloidun maan lujittuminen. (Janz & Johansson 2002.)



Kuva 9: Kalkin reaktiotuotteiden diffuntoitumisvyöhyke stabiloidussa maassa: a) kalkki-kipsipilari b) sementti-kuonapilari (Kuusipuro).

Stabiloinnissa voidaan käyttää myös sammutettua kalkkia, joskin sen käyttö on melko vähäistä. Sammutettu kalkki ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) on jo hydratoitunut ennen maahan sekoittamista, jolloin sen lujittava vaikutus perustuu ainoastaan potsolaanireaktioihin ja ioninvaihtoon. Koska sammutettu kalkki ei enää hydratoitu ja sido vettä eikä muodosta runsaasti lämpöä, ovat potsolaanireaktiot hyvin hitaita. (Janz & Johansson 2002.)

3.1.4 Sementti-kalkki -stabilointi

Sementti-kalkki -seoksella stabiloitaessa ovat syntyvät reaktiot yhdistelmä sementin ja kalkin reaktioita. Sementin hydrataatio lisää stabiloidun maan alkulujuutta ja nopeuttaa lujuskehitystä. Kalkki tuottaa hydratoitumisellaan lämpöä, joka edistää sementin reaktioita sekä potsolaanireaktioita. Kalkin hydratoituminen tuottaa runsaasti kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), jota tarvitaan potsolaanireaktioissa ja ioninvaihdossa. (Janz & Johansson 2002.)

Tarvittava kalkin määrä sementti-kalkki -seoksessa määräytyy potsolaanisten mineraalien määrän mukaan. Kun kaikki potsolaani on kulutettu maan ja sideaineen välisissä reaktioissa, ei kalkki enää lisää lujuutta. Usein sopiva kalkin osuus sementin ja kalkin seoksessa on 10 - 40 % ja sementin osuus 60 - 90 %. (Åhnberg et al., 1995; Janz & Johansson, 2002.) Suomessa usein käytetty kalkin ja sementin sekoitussuhde on 3:7 eli 30 % kalkkia ja 70 % sementtiä (Jyrävä 2015).

3.1.5 Stabilointi piilevästi hydraulisella tai potsolaanisella materiaalilla

Kalkin ja piioksidin suhde CaO/SiO_2 määrää materiaalin hydraulisuuden voimakkuuden. Mitä korkeampi suhde on, sitä hydraulisempi materiaali on. Sementillä on korkea kalkin ja piioksidin suhde, eli se on hyvin hydraulinen. Tällainen materiaali reagoi herkästi veden kanssa. Piilevästi hydraulinen materiaali sisältää kalkkia, ja sen CaO/SiO_2 -suhde on korkea. Materiaali vaatii kuitenkin aktivoivan aineen reaktioidensa käynnistymiseksi. (Janz & Johansson 2002.)

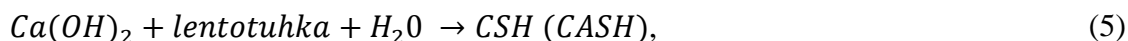
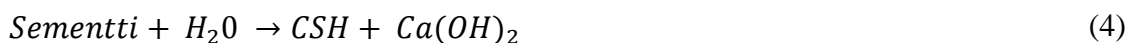
Potsolaanisen materiaalin kalkin ja piioksidin suhde on hyvin pieni, koska materiaali ei juuri sisällä kalkkia. Potsolaaniset materiaalit sisältävät kuitenkin runsaasti piioksidia. Piilevästi hydraulisen tai potsolaanisen materiaalin reaktiivisuuteen vaikuttaa merkittävästi materiaalin ominaispinta-ala ja sen rakenteen lasimaisuus. Mitä suurempi ominaispinta-ala materiaalilla on ja mitä lasimaisempi materiaali on, sen reaktiivisempi se on. (Janz & Johansson 2002.)

Piilevästi hydrauliset materiaalit, kuten masuunikuona, eivät kykene reagoimaan veden kanssa ilman reaktion käynnistävää kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Masuunikuonan aktivointiin käytetään usein kalkkia tai sementtiä, koska niiden reaktiot tuottavat kalsiumhydroksidia. Mikäli kalsiumhydroksidia on saatavilla, käyttäytyvät piilevästi hydrauliset materiaalit hydraulisesti. Reaktio jatkuu aktivoinnin jälkeen pitkälti spontaanisti

perustuen kuonan omaan kalkkipitoisuuteen. Pääasiallinen lujittuva reaktiotuote on kalsiumsilikaattihydraatti CSH, joka on koostumukseltaan samankaltainen kuin sementin ja maan reaktioissa. Lisäksi reaktiotuotteina syntyy ettringiitin ja monosulfaatin kaltaisia yhdisteitä. (Janz & Johansson 2002.)

Masuunikuonan muodostama kalsiumsilikaattihydraatti sisältää enemmän alumiini- ja magnesiumoksidia kuin sementin muodostama. Tämä johtuu masuunikuonan pienemmästä CaO/SiO_2 -suhteesta. Reaktio tuottaa lämpöä kuten sementin hydratoituminen, mutta on hyvin lämpötilariippuvainen. Lisäksi reaktio tapahtuu hitaasti verrattuna sementtiin. Lujuskehitys on siis sementtistabilointia hitaampaa, mutta se toisaalta jatkuu usein pidempään, ja lopullinen lujuus voi olla korkeampi kuin sementillä stabiloitaessa. (Janz & Johansson 2002.)

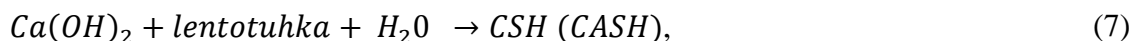
Potsolaanisen materiaalin, kuten lentotuhkan, lujittava vaikutus perustuu potsolaaniseen reaktioon kalsiumhydroksidin ja lentotuhkan sisältämien yhdisteiden välillä. Kalsiumhydroksidi voi olla peräisin esimerkiksi sementistä tai kalkista. Käytettäessä sementtiä aktivoivana materiaalina, ovat reaktiot reaktioyhtälöiden 4 ja 5 mukaiset. (Janz & Johansson 2002.)



joissa

H_2O	vesi
CSH	kalsiumsilikaattihydraatti
Ca(OH)_2	kalsiumhydroksidi
CASH	kalsiumaluminaattisilikaattihydraatti

Käytettäessä kalkkia aktivoivana materiaalina, ovat reaktiot reaktioyhtälöiden 6 ja 7 mukaiset.



joissa

CaO	kalsiumoksidi, muut kuten yllä.
-----	---------------------------------

Potsolaaninen reaktio tapahtuu erityisen hitaasti, koska lujittuva reaktiotuote kalsiumsilikaattihydraatti muodostaa kalvon lentotuhkapartikkelien ympärille vähentäen niiden reaktiivisuutta ja hidastaen reaktioita. Toisaalta lopullinen lujuus voi olla korkeampi kuin mitä ilman lentotuhkan lisäystä voitaisiin saavuttaa. (Janz & Johansson 2002.)

Piilevästi hydrauliset ja etenkin potsolaaniset sideaineet kuluttavat kalsiumhydroksidia reaktioissaan. Maaperän omat potsolaaniset mineraalit jäävät hyödyntämättä, kun kalsiumhydroksidi kuluu potsolaanisen sideaineen reaktioihin. Tällöin reaktiotuotteita syntyy vähemmän ja lujuus jää pienemmäksi. Tämän vuoksi potsolaanisen sideaineen lisääminen potsolaanisia mineraaleja sisältävään maahan (savi ja siltti) on usein hyödytöntä. (Janz & Johansson 2002.)

3.1.6 Kipsi sideaineseoksissa

Kipsi muodostaa veden ja saven mineraalien kanssa nopeasti lujittuvaa ettringiittiä, jolla on suuri tiheys. Se on muodoltaan neulamaista, ja se täyttää maapartikkelien välit. Ettringiitti nopeuttaa usein lujuudenkasvua. Ettringiitin muodostuminen lisää maan tilavuutta. Tämä saattaa rikkoa vastikään syntyneitä sidoksia. Ongelmaa ei kuitenkaan synny, jos aiemmat reaktiot ovat tapahtuneet riittävän kauan aiemmin. Lisäksi ettringiitti vaatii säilyäkseen suhteellisen korkean pH:n (yli 10). (Janz & Johansson 2002; Åhnberg 2006.)

Kipsiä voidaan käyttää sementin tai kalkin kanssa, tai vastaavasti yhdessä kummankin kanssa. Kipsin kanssa käytetty kalkki on usein sammutettua kalkkia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sillä poltettua kalkkia ja kipsiä käytettäessä sekoitustyön epähomogeenisuus on usein ongelma. (Åhnberg 2006.)

3.2 Maan ominaisuuksien vaikutus stabiloituvuuteen

Maan stabiloituvuuteen ja siihen mihin suuntaan ja kuinka paljon maan luokitus- ja geotekniset ominaisuudet muuttuvat vaikuttavat sideainereseptin, sekoitustyön ja lujittumisolosuhteiden lisäksi monet maan ominaisuudet. Esimerkiksi maan vesipitoisuuden, rakeisuusjakautuman, pH:n, humuksen määrän ja laadun sekä maan mineraalikoostumuksen on todettu vaikuttavan maan stabiloituvuuteen. (mm. Brandl, 1981; Janz & Johansson 2002; Chew et al. 2004.) Alla olevissa kappaleissa esitelty yleisesti maan ominaisuuksien vaikutuksia stabiloituvuuteen. Stabiloidun maan luokitus- ja geoteknisiä ominaisuuksia käsittelevissä alaluvuissa on tarkasteltu tarkemmin mekanismeja, joiden vuoksi tietyt maan ominaisuudet vaikuttavat maan stabiloituvuuteen ja stabiloidun maan luokitus- ja geoteknisiin ominaisuuksiin.

Maan vesipitoisuus vaikuttaa stabiloituvuuteen etenkin sementtistabiloinnissa, sillä vesi-sementtisuhde vaikuttaa sementin lujittumiseen. Paljon vettä sisältävä maa tarvitsee enemmän sideainetta kuin vähän vettä sisältävä maa saavuttaakseen saman vesi-sementtisuhteen. (Janz & Johansson 2002.) Maan pH vaikuttaa stabiloituvuuteen etenkin kalkkistabiloinnissa, sillä potsolaanireaktiot vaativat riittävän korkean pH:n reagoidakseen tehokkaasti (esim. Chew et al. 2004). Suuren savilajitepitoisuuden ja korkean plastisuusluvun on raportoitu (Broms 1986; Little 1995; Esrig 1999) heikentävän

maan lujittumista, ja tällaiset maa-ainekset tarvitsevat enemmän sideainetta stabiloituakseen kuin vähän plastiset maa-ainekset.

Orgaanisen aineksen sisältämät humushapot heikentävät maan stabiloituvuutta, sillä ne estävät potsolaanireaktioita. Humushapot reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa. Reaktioissa muodostuu liukenemattomia yhdisteitä, jotka saostuvat maanpartikkelien pinnalle. Tällöin potsolaanireaktioiden jatkuminen ja lujuuden kasvu estyvät tai hidastuvat, koska potsolaaniset mineraalit eivät pääse reagoimaan saostumien alta. Humushapot laskevat myös maan pH:ta, jolloin potsolaanireaktioiden vaatima korkea pH ei toteudu. Humushapot vaikuttavat täten stabiloituvuuteen heikentävästi etenkin kalkkistabiloinnissa, jossa potsolaanireaktioilla on suuri merkitys lujittumisessa. Saven ja siltin humuspitoisuus on yleensä niin pieni, ettei se vaikuta maan stabiloituvuuteen, kun sideaineena käytetään sementtiä. Sementin reaktioissa muodostuva CSH-geeli pystyy muodostumaan, vaikka humushapot reagoisivat kalsiumhydroksidin kanssa. (Janz & Johansson 2002.)

Humushapot heikentävät turpeen ja liejun stabiloituvuutta etenkin kalkilla stabiloitaessa yllä kuvatulla tavalla. Tämän vuoksi paljon orgaanista ainesta sisältäviä maa-aineksia, kuten turpeita, ei yleensä stabiloida kalkilla. Tutkimukset ovat antaneet viitteitä siitä, että humushappojen vuoksi sideainemäärän täytyy ylittää tietty kynnyksarvo ennen kuin maassa tapahtuu stabiloitumista. Tämä voi johtua siitä, että sideaineen täytyy neutraloida humushappoja ennen kuin varsinainen stabiloituminen alkaa. Paljon humushappoja sisältävä maa tarvitseeikin enemmän sideainetta stabiloituakseen kuin vähän humushappoja sisältävä maa. (Janz & Johansson 2002.)

Tremblayn et al. (2002) tutkimuksessa kahteen maanäytteeseen lisättiin useita erilaisia orgaanisia yhdisteitä, minkä jälkeen maan stabiloituvuutta sementillä tarkasteltiin. Osa yhdisteistä heikensi stabiloituvuutta selvästi, ja osalla ei ollut vaikutusta stabiloituvuuteen. Osa yhdisteistä heikensi saavutettavaa lujuutta, ja osa pidensi lujittumisaikaa, vaikka lopullinen lujuus oli yhtä hyvä kuin muita orgaanisia yhdisteitä sisältäneessä maassa. Tutkimuksessa esitetään, että osa orgaanisista yhdisteistä nostaa huokosveden pH:ta merkittävästi. Jos pH on 9 tai vähemmän, sementin hydrataatioreaktioissa syntyvät reaktiotuotteet muuttuvat liukoiseen muotoon, ja potsolaanireaktiot estyvät. Liian alhainen pH neutraloi sementtistabiloidun maan pH:ta, ja osa sementistä kuluu pH:n kasvattamiseen ennen kuin lujittumisreaktiot alkavat. Tremblay et al. (2002) toteavat myös, että korkea sulfaattipitoisuus estää ettringiitin muodostumisen, mikä heikentää saavutettavaa lujuutta.

Turve ja lieju vaativat usein paljon sideainetta stabiloituakseen. Orgaanista ainesta sisältävät maalajit sisältävät vähemmän kiinteitä partikkeleita kuin savi ja siltti, jolloin sideainetta tarvitaan paljon sitomaan toisistaan verrattain kaukana olevat partikkelit toisiinsa. Nämä maalajit ovat myös huokoisempia, ja niiden vesipitoisuus on suurempi kuin vähän orgaanista ainetta sisältävillä maalajeilla. Korkean vesipitoisuuden vuoksi

veden ja sementin suhde jää matalaksi, jolloin myös lujuus jää pieneksi. Vesi-sementtisuhteen suurentamiseksi seokseen täytyy lisätä sideainetta. Stabiloituvuutta voidaan parantaa myös lisäämällä mineraalista ainesta, eli kiinteiden partikkelien määrää. Tällaiset partikkelit eivät varsinaisesti aiheuta maassa lujitusreaktioita, mutta ne lisäävät saavutettavaa lujuutta vähentämällä toisiinsa liitettävien partikkelien välimatkaa. Toisaalta jotkin tällaiset mineraaliset aineet saattavat myös osallistua potsolaanireaktioihin, mikä edelleen edistää maan lujittumista. Mikäli mineraalisen aineksen raekoko on suhteellisen suuri ja ominaispinta-ala pieni (esim. hiekka), ei mineraalinen aines juuri osallistu potsolaanireaktioihin. (Janz & Johansson 2002.)

Orgaaniset maalajit sisältävät usein vain vähän savimineraaleja, jolloin myös potsolaanisia mineraaleja on vähän. Tällöin potsolaanisia reaktioita ei tapahdu, vaikka hydraatiossa syntyvää kalsiumhydroksidia on läsnä. Tämä heikentää etenkin kalkin lujittavaa vaikutusta, koska sen lujittumisreaktiot perustuvat pitkälti potsolaanireaktioihin. Myös kalkin ja sementin seos lujittaa huonosti paljon orgaanista ainesta sisältävää maata. Runsaasti orgaanista ainesta sisältävät maa-ainekset voivat hyötyä erilaisten lisäaineiden, kuten piilevästi hydraulisten tai potsolaanisten materiaalien lisäyksestä sideaineeseen. Orgaaniseen maahan voidaan myös lisätä kalsiumhydroksidia potsolaanireaktioissa kuluttavaa materiaalia, jolloin potsolaanireaktioita voi esiintyä. (Janz & Johansson 2002.)

Kalkkistabiloinnilla saavutettavaan lujuuteen vaikuttaa merkittävästi maan mineraloginen koostumus. Kalkki reagoi maan potsolaanisten mineraalien kanssa, jolloin syntyvien reaktiotuotteiden määrä ja stabiloinnilla saavutettava lujuus ovat riippuvaisia näiden mineraalien määrästä. (esim. Åhnberg 2006.) Kalkilla stabiloitaessa lujuus kasvaa suhteessa kalkin määrään niin kauan kuin maassa on potsolaanisia mineraaleja käytettävänä. Tämän jälkeen kalkin lisäys ei enää kasvata lujuutta. Potsolaanireaktiot vaativat tapahtuakseen tietyn määrän savimineraaleja, jotta reaktiossa on riittävästi alumiini- ja piiyhdisteitä saatavilla. (Janz & Johansson 2002.)

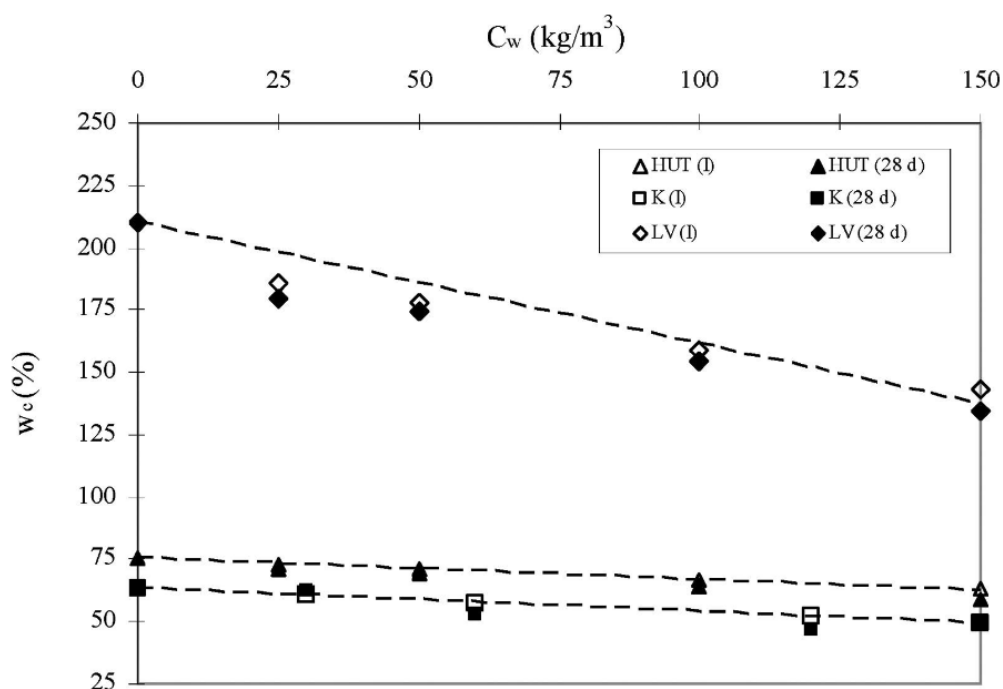
Eri savimineraalien on havaittu olevan reagoivuudeltaan erilaisia (esim. Brandl 1999; Chew et al. 2004). Esimerkiksi montmorilloniitti ja kaoliniitti vaikuttaisivat olevan reaktiivisempia kuin esimerkiksi illiitti (Thompson 1967; Chew et al 2004). Montmorilloniitti on ioninvaihto- ja vedenpidätyskyvyltään tehokkain savimineraali, ja illiitillä ioninvaihto- ja vedenpidätyskyky ovat montmorilloniitin ja kaoliniitin väliltä (Lindberg 1983). Suomalaisten sedimenttisavien savimineraalit ovat pääasiassa illiittia sekä klooriittia ja vermikuliittia tai näiden seoshilamineraaleja Paisuvahilaisia savimineraaleja (smektiittiryhmän mineraalit, montmorilloniitit) tai kaoliniittia ei esiinny Suomessa savikerrostumissa. Kaoliniittia ja paisuvahilaisia savia on sen sijaan tavattu myös Suomessa kallioperän rapautumissa ja kallioruhjeiden savimuodostumissa. (Hartikainen 1992 ; Mälkki 1998.)

3.3 Stabiloidun maan luokitus- ja geotekniset ominaisuudet

3.3.1 Vesipitoisuus ja tilavuuspaino

Stabiloinnin myötä maan vesipitoisuus pienenee, koska kuiva sideaine ja sideainereaktiot sitovat vettä. Sideainetta lisättäessä kiinteiden partikkelien määrä maassa kasvaa, jolloin vesipitoisuus pienenee. Sideaineen reagoidessa veden kanssa (hydrataatio ja pot-solaanireaktiot) vettä sitoutuu myös syntyviin reaktiotuotteisiin. Reaktiotuotteisiin sitoutunut vesi ei haihdu kuivattaessa, ja vesipitoisuus pienenee. Lisäksi sekoitustyö aiheuttaa jonkin verran veden haihtumista stabiloitavasta maasta. Siihen kuinka paljon vesipitoisuus muuttuu, vaikuttavat stabiloitavan maan ominaisuudet (alkuperäinen vesipitoisuus ja maa-aineksen tyyppi), käytetty sideaine ja sideaineen määrä. (Åhnberg 2006.)

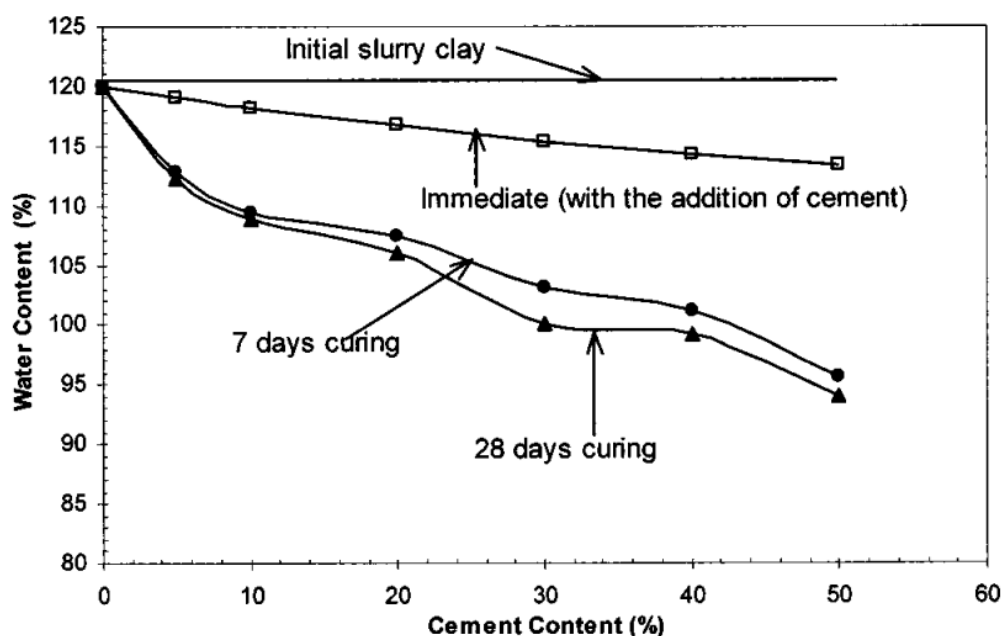
Vesipitoisuus muuttuu eniten ensimmäisen viikon aikana sideaineen sekoituksesta. Vesipitoisuus jatkaa pienenemistä ainakin ensimmäisen kuukauden ajan ja usein tätä pidempään, mutta muutos on tällöin huomattavasti hitaampaa. (Åhnberg, 2006.) Kuvassa 10 on esitetty Hassanin et al. (2008) tutkimuksessa sementtistabiloiduista runkoaineista määritetyt vesipitoisuudet 1 ja 28 vuorokauden kuluttua stabiloinnista. Tutkimuksessa stabiloitiin kahta suomalaista savea ja yhtä suomalaista savista liejua eri määrillä sementtiä. Savien alkuperäiset vesipitoisuudet olivat noin 75 % (Clay 1, HUT) ja 63 % (Clay 2, K). Liejun (Clay 3, LV) alkuperäinen vesipitoisuus oli 210 %.



Kuva 10: Sementtistabiloitujen savien vesipitoisuus sekoituksen jälkeen ja 28 vuorokauden lujittumisaajan jälkeen. I = heti sekoituksen jälkeen tehty määrittäminen. C_w = sementtimäärä [kg/m³]. (Hassan et al. 2008.)

Vesipitoisuus pieneni melko lineaarisesti sementtimäärän kasvaessa. Heti sekoituksen jälkeen ja 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen määritetyissä vesipitoisuuksissa ei ollut suuria eroja. Savisen liejun vesipitoisuus pieneni eniten.

Chew et al. (2004) havaitsivat, että singaporelaisen saven (merisedimentti) vesipitoisuus pieneni jyrkimmin pienillä (<10 %) sementtimäärillä (kuva 11). Tätä suuremmilla sementtimäärillä vesipitoisuuden muutostahti hidastui. Ero 7 ja 28 vuorokauden vesipitoisuuksissa kasvoi samanaikaisesti, ja tasaantui suurilla sementtimäärillä. Tämä viittaa siihen, että pienillä sementtimäärillä sementin lisäys lisää hydrataatio- ja potsolaanireaktioita ja niihin kuluvan veden määrää. Kun riittävän suuri sementtipitoisuus on saavutettu, ei reaktioiden määrä enää kasva.

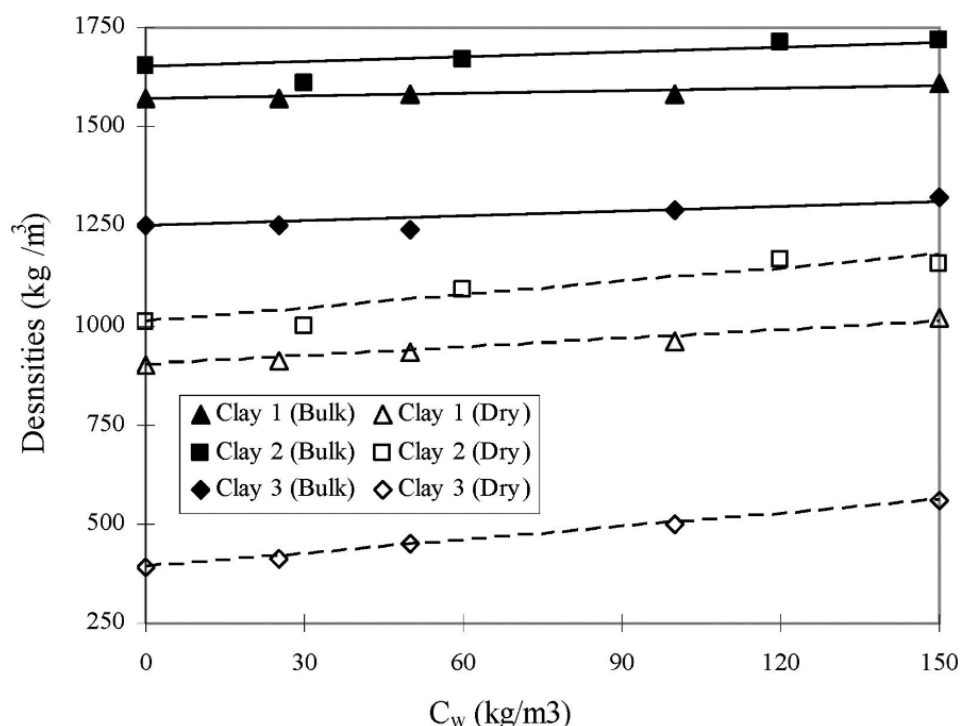


Kuva 11: Sementtipitoisuuden ja lujittumisajan vaikutus vesipitoisuuteen (Chew et al. 2004).

Chew'n et al. (2004) mukaan vaikuttaa siltä, että nopeat hydrataatioreaktiot tapahtuvat ensimmäisen viikon aikana, ja potsolaanireaktioiden vaikutus kasvaa tämän jälkeen. Tutkimuksessa käytetty savi koostui pääasiassa kaoliniitista ja illiitistä. Tulokset antoivat viitteitä, että kaoliniitti reagoi herkemmin potsolaanisesti kuin illiitti, mikä ilmeni kaoliniitin loppumisena ja vesipitoisuuden tasaantumisenä suurilla sementtimäärillä. Koska sementin ja veden hydrataatioreaktio tapahtuu hyvin nopeasti, on todennäköistä, että 7 ja 28 vuorokauden välillä tapahtuva vesipitoisuuden muutos johtuu pääasiassa potsolaanireaktioista. Tämän vuoksi 7 ja 28 vuorokauden tulosten eroavaisuus kasvaa pienillä sementtimäärillä, kun hydrataatioreaktio hiipuu ja potsolaaniset reaktiot alkavat vaikuttaa. Suuria sementtimääriä käytettäessä 7 ja 28 vuorokauden vesipitoisuuksien eroavaisuus tasaantuu, kun potsolaanireaktiot tasaantuvat kaoliniitin määrän vähennytyä. Tutkimuksessa käytetty sideainepitoisuus oli suomalaisittain varsin suuri, 195 - 475 kg/m³, ja stabilointi tehtiin slurry-menetelmällä eli sementin ja veden seoksena.

Maan tilavuuspaino yleensä kasvaa stabiloitaessa, mutta kasvu on melko pientä. Kuivaa sideainetta käytettäessä tilavuuspainon voidaan otaksua olevan samansuuruinen tai hieman suurempi kuin alkuperäisen tilavuuspainon. Turvestabiloinnissa tilavuuspaino voi kuitenkin kasvaa merkittävästi. Kasvu voi olla jopa 20 % jos käytetty sideainemäärä on yli 300 kg/m^3 . Pian stabiloinnin jälkeen toteutettu esikuormitus lisää tilavuuspainoa stabiloiduilla turpeilla entisestään. Sideainereaktiot pienentävät maan vesipitoisuutta, ja sideaineen lisäys kasvattaa myös kiinteiden partikkelien määrää maassa. Tällöin maan tilavuuspaino kasvaa. (Åhnberg 2006.)

Kuvassa 12 on esitetty Hassanin et al. (2008) tutkimuksessa tarkasteltujen näytteiden (Clay 1 - 3) märkä- ja kuivairtitiheydet.



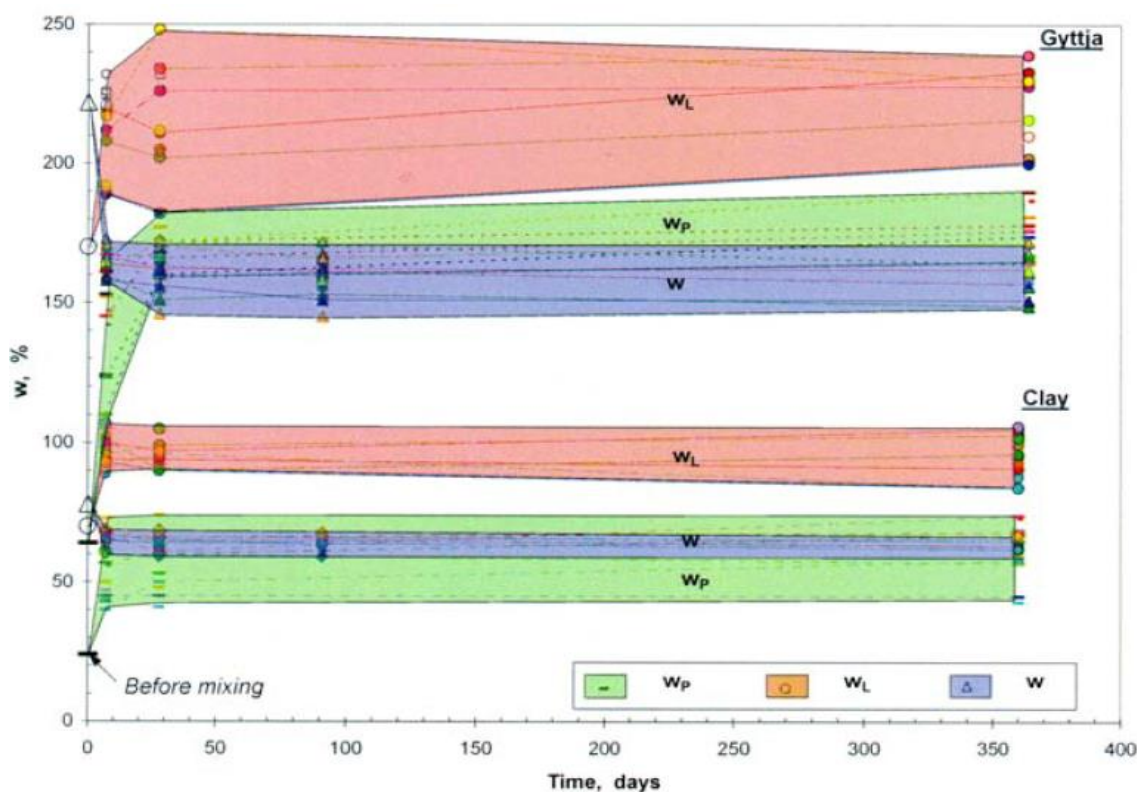
Kuva 12: Märkä- ja kuivairtitiheydet 28 vuorokauden lujittumisajan jälkeen (Hassan et al. 2008).

Kuvasta nähdään, että sekä märkä- että kuivairtitiheydet ja siten myös tilavuuspainot pääasiassa kasvoivat sementtimäärän kasvaessa, mutta matalimmilla sementtimäärillä märkätilavuuspainot pysyivät ennallaan tai pienenevät hieman. Kuivatilavuuspainot kasvoivat hieman enemmän kuin märkätilavuuspainot. Vaikka maapartikkelit flokkuloituvat ja maan rakenne muuttuu, voidaan todeta, että maan tilavuuspaino kasvaa karkeasti lineaarisesti sementtimäärän suhteen. Sementtistabiloinnissa maan rakenteen muutos ei siis vaikuta tilavuuspainoon merkittävästi. Sitä kuinka paljon tilavuuspaino kasvaa, voidaan arvioida karkeasti lisättävän sideaineen tiheydellä (kg/m^3), vaikka maassa tapahtuu myös kemiallisten reaktioiden myötä rakenteellisia muutoksia. (Hassan et al. 2008.)

Todellinen tilavuuspainon muutos on usein pienempi kuin sideaineen tiheyden aiheuttama lisäys, sillä rakenteeseen jää ilmahuokosia tiivistystyöstä huolimatta. Käytetty sideaine voi vaikuttaa myös tiivistystyön onnistumiseen, sillä eri sideaineet vaikuttavat eri tavoin stabiloidun maan käsiteltävyyteen ja tiivistettävyyteen. Åhnbergin (2006) mukaan kalkkistabiloidun maan käsiteltävyys oli parempi kuin sementtistabiloidun maan, ja kalkkistabiloidun maan tilavuuspainot kasvoivat keskimäärin enemmän kuin sementtistabiloidun maan tilavuuspainot. Lisäksi kalkkistabiloidussa maassa tapahtuu enemmän rakenteellisia muutoksia kuin sementtistabiloidussa maassa. Tämä johtuu ioninvaihtoreaktioiden aiheuttamasta savipartikkelien flokkulaatiosta, joka tapahtuu pian sideaineen sekoituksen jälkeen. Kalkin sammuminen lisää myös jonkin verran maan tilavuutta, kun muiden sideaineiden lisäys aiheuttaa vain vähän tilavuudenmuutoksia maassa. Kalkkistabiloidun maan tilavuuden kasvu voi lisätä kokonaisvaakakuormaa maassa ja aiheuttaa viereiseen maahan siirtymiä ja konsolidoitumista. (Åhnberg 2006.)

3.3.2 Konsistenssirajat

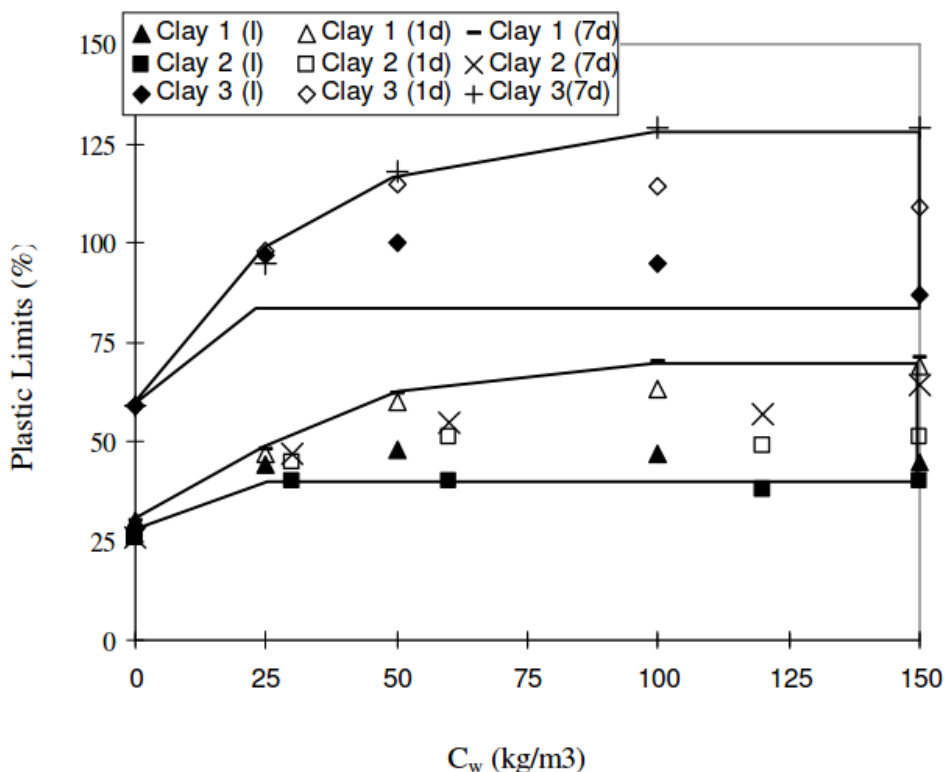
Tutkimuksissa on havaittu, että stabiloinnilla on selkeä vaikutus maan konsistenssirajoihin. Åhnbergin väitöskirjassa (2006) havaittiin, että ruotsalaisten pehmeiden savien plastisuusraja ja juoksuraja kasvavat yleensä stabiloinnin jälkeen. Erittäin plastisten ja orgaanista ainesta sisältävien maiden juoksuraja sen sijaan pienenee. Åhnberg (2006) tutki kahden saven ja savisen liejun konsistenssirajoja 7 - 365 vuorokauden lujittumisaian jälkeen. Sideaineena käytettiin viittä erilaista sementtiä ja kalkkia, kolmea lentotuhkaa, masuunikuonaa ja useita yhdistelmiä näistä. Lisäksi osaan sideaineseoksista lisättiin erilaisia lisäaineita, kuten kalsiumkloridia ja kalkkiuunin suodinpölyä (kiln dust). Kuvassa 13 on esitetty toisen saven ja liejun vesipitoisuudet (w) juoksurajat (w_L), plastisuusrajat (w_P) ennen ja jälkeen stabiloinnin. Eri sideaineresepteillä saadut tulokset on sisällytetty samanvärisiin alueisiin



Kuva 13: Vesipitoisuuden sekä juoksu- ja plastisuusrajan muutokset stabiloidulla savella (kuvan alempi puolisko) ja liejulla (kuvan ylempi puolisko) (Åhnberg 2006).

Kuvasta nähdään, että saven vesipitoisuus pieneni ja plastisuus- ja juoksuraja kasvoivat. Stabiloinnin jälkeen savi oli plastisessa tai kiinteässä konsistenssissa, kun ennen stabilointia se oli juoksevassa konsistenssissa. Lieju käyttäytyi samankaltaisesti kuin savi, vaikkakin muutokset olivat selvästi suurempia. Toinen savista oli merisedimentti. Eri sideaineet vaikuttivat samankaltaisesti runkoaineiden konsistenssirajoihin. Muutokset tapahtuivat pian stabiloinnin jälkeen, ja ne pysyivät lähes ennallaan lujittumisajan kasvaessa. Brandl'n (1999) tutkimuksessa havaittiin, että juoksu- ja plastisuusraja pysyivät lähes muuttumattomina kymmeniä vuosia stabiloinnin jälkeen tehdyissä määrityksissä.

Myös muut ovat saaneet samankaltaisia tuloksia. Hassan & al. (2008) raportoivat suomalaisilla savilla tehdyssä tutkimuksessa, että plastisuusraja kasvoi kaikilla näytteillä välittömästi sideaineen sekoituksen jälkeen. Tutkitut savet olivat lihava ja hyvin plastinen savi (Clay 1), kohtalaisen plastinen savinen siltti (Clay 2), jonka pH (5,2) oli hapan sekä savinen lieju, jonka humuspitoisuus oli noin 9 % (Clay 3). Savien alkuperäiset vesipitoisuudet olivat noin 75 % (Clay 1) ja 63 % (Clay 2). Liejun (Clay 3) alkuperäinen vesipitoisuus oli 210 %. Sideaineena käytettiin sementtiä. Stabiloinnin jälkeen määritetyt plastisuusrajat on esitetty kuvassa 14.



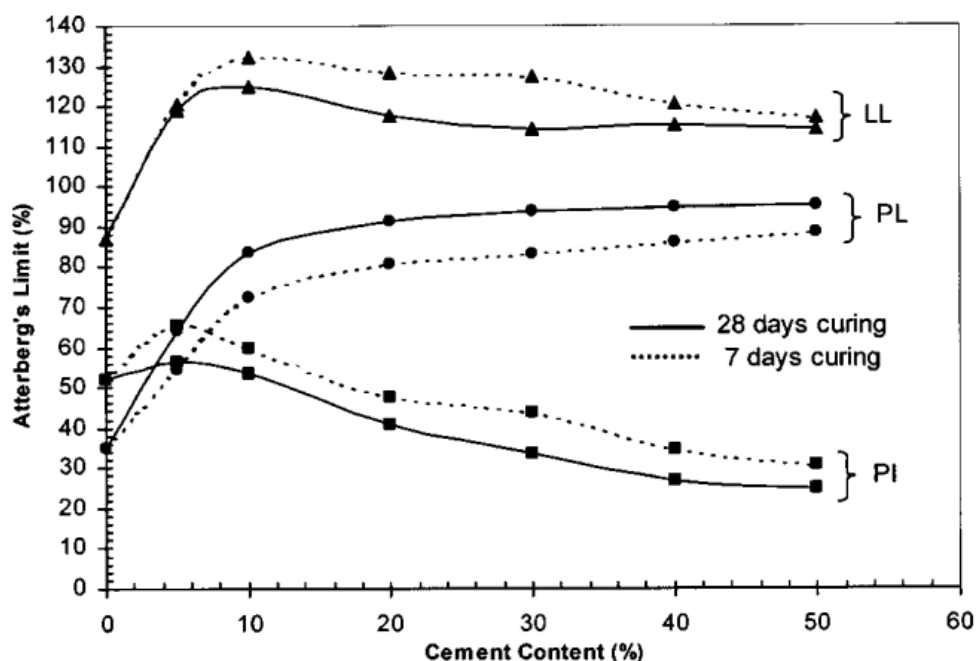
Kuva 14: Plastisuusrajojen muutos eri sementtimäärillä välittömästi sekoituksen jälkeen sekä 1 ja 7 vuorokauden kuluttua stabiloinnista. I = heti sekoituksen jälkeen tehty määrittäminen. (Hassan et al. 2008.)

Plastisuusraja kasvoi noin 12 - 14 % orgaanista ainesta sisältämättömillä savilla, ja savi-sen liejun plastisuusraja kasvoi noin 30 - 40 %. Sementtimäärän kasvu ei vaikuttanut merkittävästi savien 1 ja 2 plastisuusrajaan, mutta savisen liejun plastisuusraja pieneni sideainemäärän kasvaessa.

Suurimmat muutokset konsistenssissa tapahtuivat ensimmäisten 24 tunnin aikana. Plastisuusraja kasvoi jonkin verran myös ensimmäisen lujittumisvuorokauden jälkeen. Sementillä havaittiin kynnyksipitoisuus (noin 50 kg/m³), jota pienemmällä määrällä konsistenssi ei merkittävästi muuttunut ensimmäisen 24 tunnin jälkeen. Riittävän suurilla sementtimäärillä plastisuusraja kasvoi edelleen ensimmäisen vuorokauden jälkeen. Tietyn sementtimäärän ylittävillä määrillä ei ollut enää vaikutusta plastisuusrajaan. Muutos plastisuusrajassa oli sitä suurempi, mitä suurempi runkoaineen alkuperäinen vesipitoisuus oli. Myös Leivon (2009) diplomityössä kuvattiin vastaava korrelaatio maan alkuperäisen vesipitoisuuden ja plastisuusrajan muutoksen välillä. Toisaalta Hassanin et al. (2008) tutkimuksessa suurin vesipitoisuus oli liejuisella savella, joten verrattain suuri plastisuusrajan muutos on saattanut aiheutua myös muista näytteen ominaisuuksista.

Myös Locat et al. (1996) raportoivat, että kanadalaisen saven (merisedimentti) konsistenssirajat käyttäytyivät edellä esitetysti kalkilla stabiloitaessa. Sivapullaiah et al. (2000) esittivät, että kalkkistabiloidun intialaisen, voimakkaasti kutistuvan ja paisuvan savisen

maan (black cotton soil) juoksuraja pieneni aluksi hieman, mutta kasvoi ajan myötä. Chew et al. (2004) raportoivat, että Singaporen savipitoisen merisedimentin juoksu- ja plastisuusraja kasvoivat sementtistabiloinnin jälkeen (kuva 15).



Kuva 15: Sementtimäärän ja lujittumisaajan vaikutus konsistenssirajoihin. LL = juoksuraja, PL = plastisuusraja ja PI = plastisuusluku. (Chew et al. 2004.)

Chew'n et al. (2004) tutkimuksessa plastisuusluku kasvoi ensin hieman, ja alkoi sitten pienentyä. Plastisuusraja kasvoi sideainemäärän kasvaessa, ja kasvu oli suurinta pieniä sementtimääriä käytettäessä. Plastisuusraja kasvoi myös 7 ja 28 päivän välillä. Juoksuraja kasvoi eniten, kun sementtimäärä oli pieni (<10 %), mutta suuria sementtimääriä käytettäessä se hieman pieneni. Pieniä sementtimääriä käytettäessä juoksu- ja plastisuusraja kasvoivat samassa tahdissa, mutta suurilla sementtimäärillä muutosvauhti ja muutoksen suunta muuttuivat.

Locat et al. (1996) esittivät konsistenssirajojen kasvun syyksi kalkkistabiloidussa maassa flokkuloituneiden savipartikkelien väliin jäävää vettä, joka ei kuitenkaan vaikuta partikkelien väliseen vuorovaikutukseen. Maahan vapautuu stabiloitaessa Ca^{2+} -ioneja, jotka muuttavat maan rakennetta näennäisesti alkuperäistä karkeammaksi. Savipartikkelit flokkuloituvat, eli kokoontuvat yhteen ryppäiksi, joiden väliin jää alkuperäistä suurempia huokosia, ja huokosiin jää vettä. Stabiloitu maa pystyy siis pidättämään rakenteessaan vettä ilman, että vesi vaikuttaa maapartikkelien vuorovaikutukseen.

Chew'n et al. (2004) mukaan konsistenssirajoihin vaikuttaa sementtistabiloinnissa lisäksi reaktiotuotteiden kapseloituminen maapartikkelien päälle. Tällöin maan reaktiokyky pienenee, mikä selittäisi juoksurajan pienenemisen suurta sementtimäärää käytettäessä. Juoksu- ja plastisuusrajan kasvua aiheuttaa todennäköisesti myös partikkelikoon kasva-

minen, kun maa flokkuloiuu ja klustereiden päälle kerrostuu reaktiotuotteita. Partikkelien tehokkaan raekoon havaittiin kasvavan, kun stabiloitua maata tarkasteltiin laserdiffraktometrilla.

Maan flokkuloituessa sen juoksu- ja plastisuusraja kasvavat. Samanaikaisesti flokkuloituneiden saviklusterien kapseloituminen reaktiotuotteiden alle reaktioiden edetessä vähentää savimineraalien aktiivisuutta. Kun savimineraalit eivät voi reagoida potsolaanisesti, vähenee savipartikkelien flokkuloituminen. Tämä havaitaan juoksurajan pienene misenä sementtimäärän kasvaessa. Toisaalta partikkelien ominaispinta-alan kasvu kasvattaa myös juoksurajaa, kun savipartikkelien kaksoisdiffuusiovyöhykkeen koko kasvaa. Tämä selittää flokkuloitumisen lisäksi juoksurajan kasvua pieniä sementtimääriä käytettäessä, kun reaktiotuotteet eivät ole vielä kerrostuneet maapartikkelien päälle. (Chew et al. 2004.)

Erittäin plastisessa maassa savipartikkelien kapseloituminen sementin reaktiotuotteiden sisälle vaikuttaisi olevan määräävää, jolloin maan juoksuraja pienenee. Sen sijaan vähän plastisen maan juoksurajaan näyttäisi vaikuttavan enemmän flokkuloituneiden partikkelien väliin jäävä vesi, jolloin juoksuraja kasvaa. (Chew et al. 2004.)

Saven kaksoisdiffuusiokerros pidättää rakenteessaan vettä, mikä vaikuttaa juoksurajaan. Mitä ohuempi kerros on, sen pienempi juoksuraja on. Saven juoksurajaan vaikuttaa myös savipartikkelien keskinäinen järjestäytyminen. Savipartikkelien järjestäytyessä flokkuloituneeseen muotoon, juoksuraja kasvaa, kun vettä pidättyy flokkuloituniden klusterien väliin. Flokkuloitumisen aiheuttaa diffuusiovyöhykkeen ohentuminen. Kun diffuusiovyöhyke ohenee, vähenevät maapartikkelien väliset hylkivät voimat, jolloin partikkelit järjestäytyvät uudelleen. Diffuusiokerroksen paksuudella ja flokkuloitumisella on siis ristiriitainen vaikutus saven juoksurajaan: diffuusiokerroksen ohentuminen pienentää juoksurajaa, mutta vähentää hylkiviä voimia, jolloin partikkelit flokkuloituvat ja syntynyt rakenne pidättää vettä ja kasvattaa juoksurajaa. Sridharan (2002) esittää, että saven mineraloginen koostumus määrää, kumpi vaikutuksista on dominoiva. Montmorilloniittisilla savilla diffuusiokerroksen pidättämällä vedellä on dominoiva vaikutus saven juoksurajaan, mutta kaoliniittisilla savilla saviklustereiden väliin jäävä vesi vaikuttaa enemmän juoksurajaan.

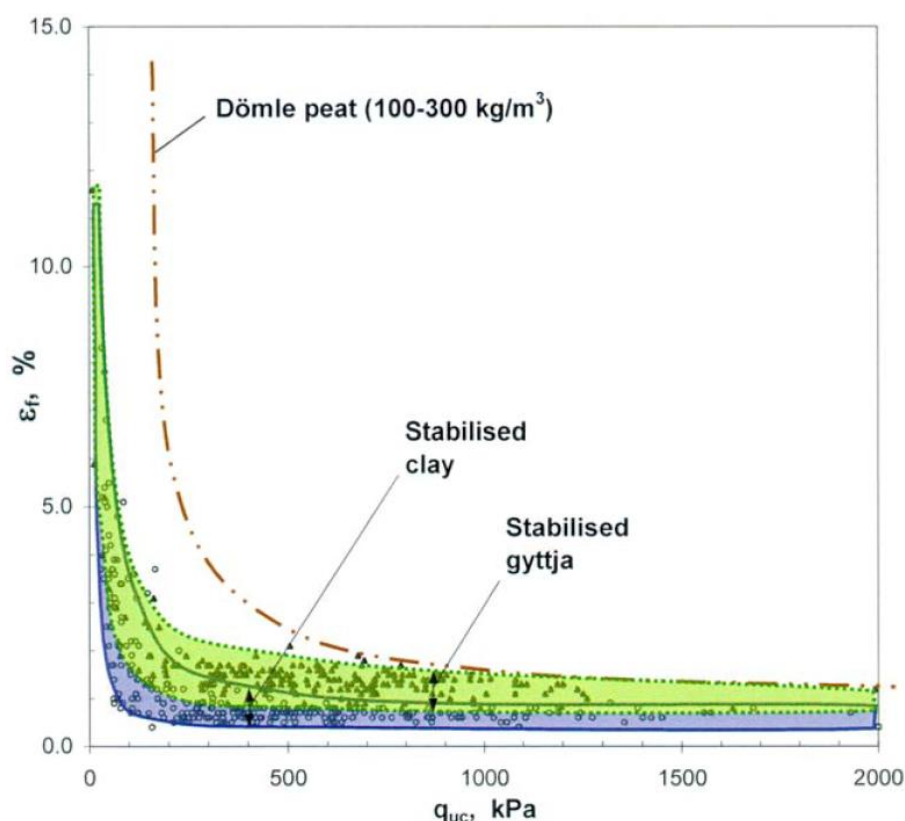
Diffuusiovyöhyke ohenee, kun huokosveden kationipitoisuus kasvaa ja varaus muuttuu. Stabilointi tuo huokosveeseen Ca^{2+} -ioneja, jolloin sähköinen diffuusiokerros ohenee. Chew'n et al. (2004) edellä kuvatussa tutkimuksessa käytetty savi koostui pääasiassa kaoliniitista ja illiitistä. Sridharanin (2002) tutkimuksessa käsiteltiin kaoliniittista ja montmorilloniittista savea, koska ne edustavat käyttäytymiseltään savimineraalien ääripäitä. Muiden savimineraalien käyttäytyminen on todennäköisesti näiden mineraalien asettamien ääripäiden sisäpuolella. Montmorilloniittinen savi on tyypillisesti erittäin

plastista ja kaoliniittinen savi selvästi vähemmän plastista kuin montmorilloniitti. Illiittinen savi asettuu plastisuudeltaan näiden väliin. (Sridharan 2002.)

Edellä kuvatut saven mineralogian aiheuttamat mekanismit ovat siis linjassa esimerkiksi Åhnbergin (2006) esittämien huomioiden kanssa. Erittäin plastisen saven juoksuraja vaikuttaisi pienentyvän stabiloitaessa, koska tällaisen maan plastisuuteen vaikuttaa määrävästi diffuusiokerroksen paksuus. Stabilointi ohentaa diffuusiokerrosta, jolloin maan plastisuus pienenee. Chew'n et al. (2004) tutkimuksessa saatiin viitteitä, että kaoliniittisen ja illiittisen saven sementtistabiloinnissa kaoliniitti reagoi herkemmin potsolaanisesti kuin illiitti, jolloin kaoliniitti kului reaktioissa loppuun. Tämä havaittiin reaktioiden hidastumisena suuria sementtimääriä käytettäessä. Eades & Grim (1960) raportoivat, että illiitti reagoi hitaammin kuin kaoliniitti ja vaatii suuremman sementtipitoisuuden reagoidakseen. Kun kaoliniitin potsolaaniset reaktiotuotteet kerrostuvat illiitin päälle ja kaoliniitti kuluu loppuun, hiipuvat saven potsolaaniset reaktiot. Voidaan siis todeta, että muutokset maan juoksu- ja plastisuusrajoissa ovat riippuvaisia stabiloitavan maan aineksen tyypistä ja mineralogiasta.

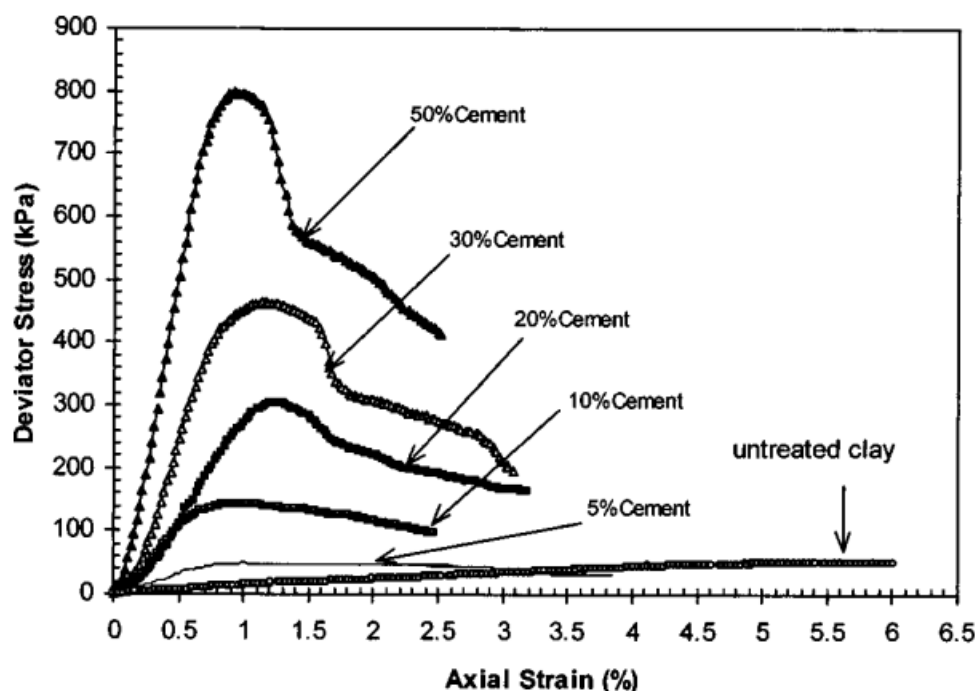
3.3.3 Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Stabiloinnin pääasiallinen tavoite on lisätä lujuutta ja vähentää maassa syntyviä muodonmuutoksia. Jäykkyys kasvaa yleensä enemmän kuin lujuus. Kuvassa 16 on esitetty, kuinka murtotilaa vastaava muodonmuutos (ϵ_f) pienenee yksiaksiaalisen puristuslujuuden (q_{uc}) kasvaessa. (Åhnberg 2006.)



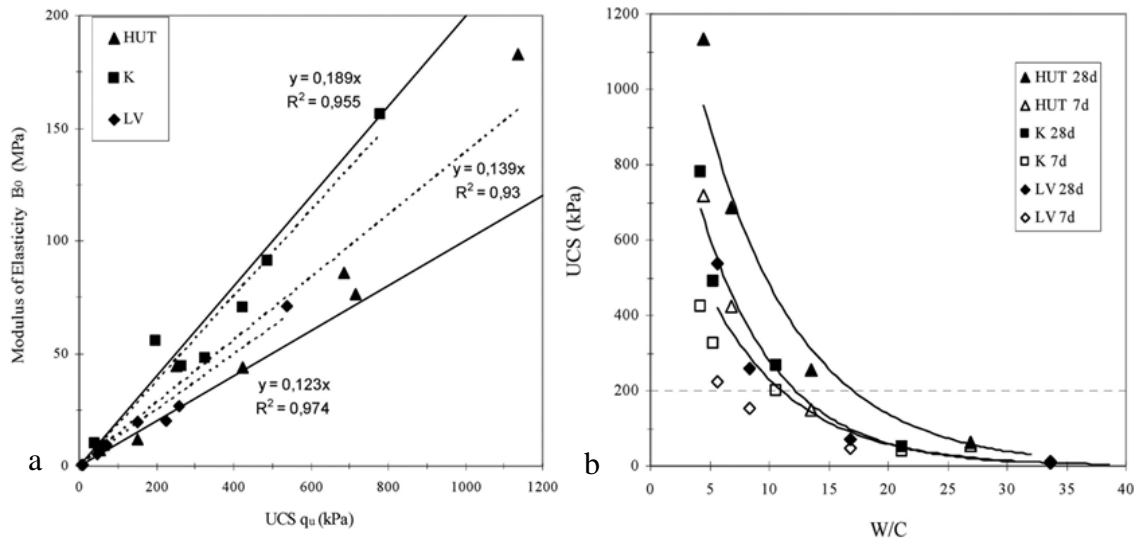
Kuva 16: Murtotilaa vastaavan muodonmuutoksen muutos suhteessa puristuslujuuden kasvuun (Åhnberg 2006).

Murtotilaa vastaava muodonmuutos pienenee merkittävästi ja lähes tasaantuu, kun puristuslujuus on suuri. Huippulujuus saavutetaan verrattain pienillä leikkausmuodonmuutoksilla. Maarakeiden pitää kiivetä toistensa yli (dilaatio) ja murtoon tarvitaan alkupe-
räistä enemmän energiaa. Maan kokoonpuristuvuus vähenee, ja murtotilassa tapahtuu dilaatiota. Murtomuodonmuutos pienenee jyrkimmin, kun puristuslujuus on noin 200 kPa. Stabiloitu turve käyttäytyy murtotilassa joustavammin ja sitkeämmin kuin muut stabiloidut pehmeät maa-ainekset. Turpeen kuidut lisäävät todennäköisesti stabiloidun turpeen lujuutta, sillä ne hidastavat turvemaan leikkautumista kuorman alla. Åhnberg (2006) havaitsi, että muodonmuutoksen ja puristuslujuuden väliseen riippuvuuteen vaikuttaa enemmän stabiloitu maalaji kuin sideainetyyppi. Myös mm. Hassan et al. (2008) esittävät samanlaisia tuloksia murtotilaa vastaavista muodonmuutoksista suomalaisilla savilla. Murtotilan muodonmuutoksen pieneminen havaitaan hyvin myös kuvasta 17, jossa on havainnollistettu sementtimäärän vaikutusta puristuslujuuteen ja sitä vastaavan muodonmuutokseen (Chew et al. 2004).



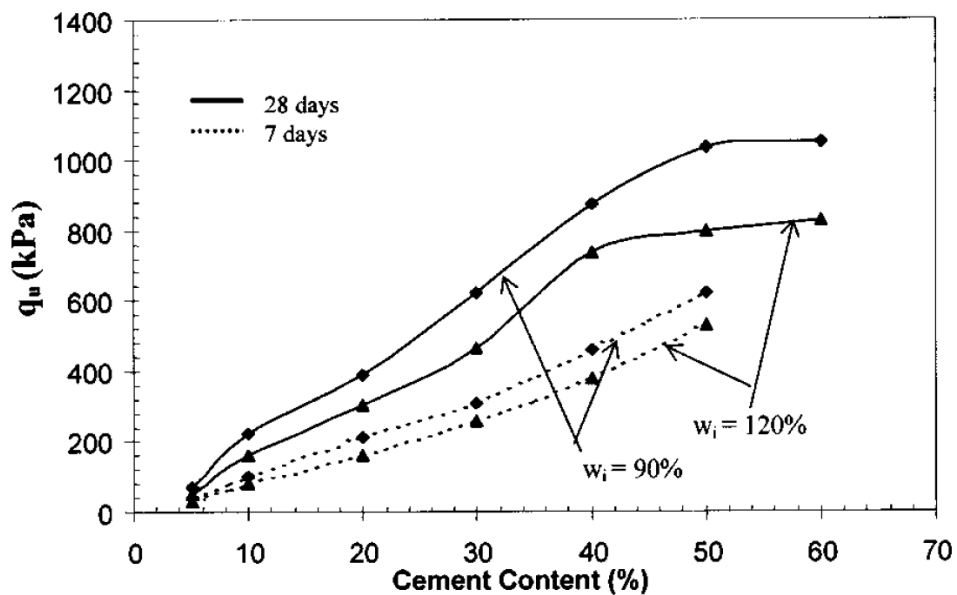
Kuva 17: Sementtimäärän vaikutus puristuslujuuteen ja sitä vastaavaan muodonmuutokseen 28 vuorokauden iässä (Chew et al. 2004).

Kuvassa 18 a on havainnollistettu kimmomoduulin ja puristuslujuuden välistä yhteyttä Hassanin et al (2008) tutkimuksessa. Kimmomoduuli E_{50} kasvoi yksiakσιαalisen puristuslujuuden kasvaessa, vaikkakin tulokset vaihtelivat savinäytteittäin. Maa käyttäytyi joustavimmin pienillä lujuustasoilla. Kimmomoduuli oli noin $100 - 200q_{\text{umax}}$. Orgaanista ainesta sisältävän saven murtotilan muodonmuutos oli suurempi kuin muilla savilla. Lorenzo ja Bergado (2006) raportoivat sementtistabiloitujen Bangkokin savien kimmomoduuliksi $115 - 150 q_{\text{umax}}$, ja EuroSoilStab-hankkeessa (2002) kuvattiin samansuuruisen kimmomoduulin ja puristuslujuuden suhde kuin Hassanin et al. (2008) tutkimuksessa. Liikenneviraston syvästabiloinnin suunnitteluohjeessa (2010) todetaan, että lujittuneen massastabiloidun maan kimmomoduuli on usein $350 - 450$ -kertainen stabiloidun maan leikkauslujuuteen nähden. Mikäli suhdeluku muutetaan kimmomoduulin ja puristuslujuuden väliseksi, on se $175 - 225$ -kertainen.



Kuva 18: Sementtistabiloidun maan ominaisuuksia: a) kimmomoduulin ja puristuslujuuden yhteys (Hassan et al. 2008), b) puristuslujuuden ja vesi-sementtisuhteen yhteys (Hassan & Ravaska 2009).

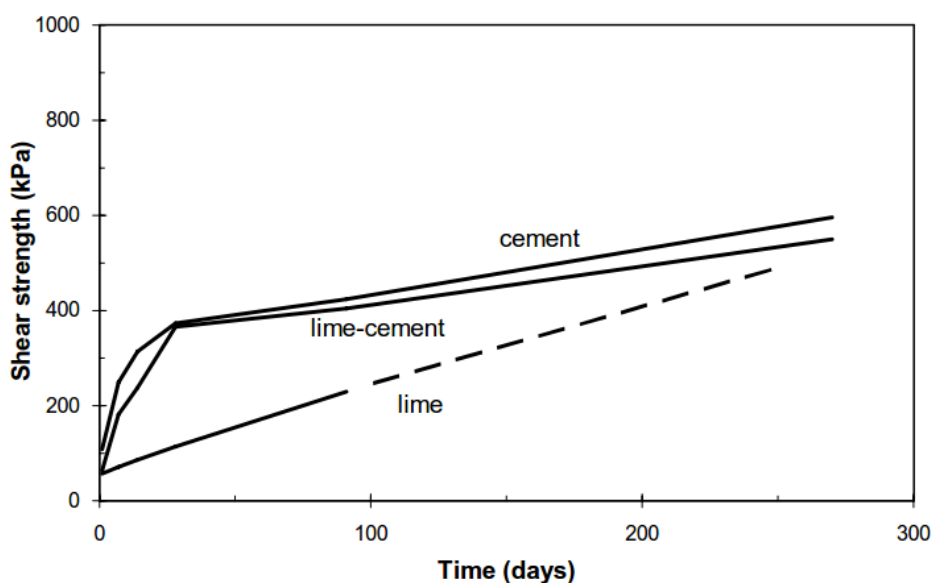
Stabiloidun maan yksiakselialinen puristuslujuus (UCS) kasvaa vesi-sementtisuhteen (W/C) pienentyessä (kuva 18 b). Erilaisten savien lujuus kehittyy kuitenkin hieman eritavoin vesi-sementtisuhteen kasvaessa. Lujuuden kasvu suhteessa vesi-sementtisuhteeseen kiihtyy, kun lujuus on noin 200 kPa. Hassanin & Ravaskan (2009) tutkimuksessa todetaan, että vesi-sementtisuhteella 10 - 18 saavutettiin yli 200 kPa puristuslujuus kaikilla tutkituilla näytteillä. Tutkitut näytteet olivat samoja kuin Hassanin et al. tutkimuksessa vuonna 2008 (ks. luku 3.3.1). Vesi-sementtisuhteen vaikutus voidaan havaita epäsuorasti myös kuvasta 19 (Chew et al. 2004).



Kuva 19: Alkuperäisen vesipitoisuuden vaikutus saavutettavaan puristuslujuuteen (Chew et al. 2004).

Kuvasta nähdään, että runkoaine, jonka vesipitoisuus oli 90 %, lujittui paremmin kuin runkoaine, jonka vesipitoisuus oli 120 %. Tämä johtuu suuren vesipitoisuuden myötä pienenevästä sementtipitoisuudesta maan ja sideaineen seoksessa.

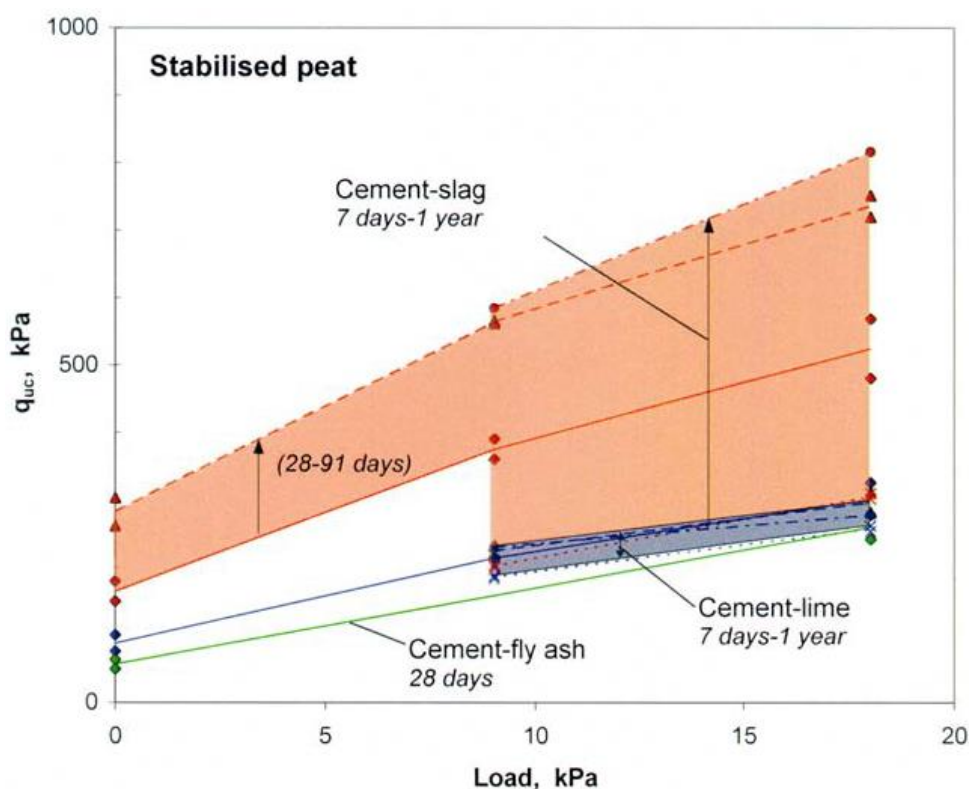
Åhnberg (2006) tutki kahden saven, savisen liejun ja turpeen yksiakksiaalisia puristuslujuuksia 7 - 365 vuorokauden lujittumisajan jälkeen. Sideaineina käytettiin monipuolises- ti yleisimmin stabiloinnissa käytettäviä sideaineita sekä erilaisia teollisuuden sivutuot- teita ja lisäaineita. Åhnberg havaitsi eroja eri sideaineilla stabiloitujen koekappaleiden puristuslujuuksissa sekä puristuslujuuden kehitymisessä lujittumisajan suhteen. Pitkän ajan lujuudet (12 kk) olivat kuitenkin lähes samansuuruisia useimmissa tapauksissa. Kuvassa 20 on havainnollistettu sementillä, kalkkisementillä ja kalkilla saavutettavaa lujuutta ja lujittumisen nopeutta. Sementti lisää alkulujuuttamista, mutta pitkällä tarkaste- luvälillä eri sideaineilla saavutettavat lujuudet ovat melko samansuuruisia.



Kuva 20: Lujuudenkehitys sementillä, kalkkisementillä ja kalkilla (Åhnberg et al. 1995).

Brandl (1999) esittää, että kalkkistabiloinnissa maan lujuus kasvaa tiettyyn kalkkipitoi- suuteen saakka, jonka jälkeen lujuus alkaa heiketä. Lujuuden pieneneminen kynnysar- von ylittyessä aiheutuu maan ja sideaineen muodostamasta rakenteesta, jossa sidokset eivät muodostu täydellisesti. Kynnysarvo kasvaa suhteessa lujittumisaikaan. Tällaista, lujuutta heikentävää vaikutusta ei ole havaittu käytettäessä sementtiä taloudellisina mää- rinä.

Turpeen lujuuteen ja kuormituksessa syntyviin muodonmuutoksiin vaikuttaa merkittä- västi esikuormitus (kuva 21) (Åhnberg 2006).



Kuva 21: Esikuormituksen vaikutus turpeen puristuslujuuteen eri sideaineilla (Åhnberg 2006).

Esikuormitus tiivistää maata, jolloin sideainehiukkaset pääsevät lähemmäs toisiaan, ja niiden välille syntyy alkuperäistä tehokkaammin sidoksia. Esikuormituksen vaikutus on sitä suurempi mitä suurempaa kuormaa käytetään, mitä löyhempää turve on ennen esikuormitusta sekä mitä nopeammin esikuormitus aloitetaan sekoitustyön jälkeen. Sideainereaktiot muodostavat nopeasti sidoksia, ja esikuormituksen aiheuttama painuma pienenee nopeasti suhteessa lujittumisaikaan. Esikuormitus lisää maan tiheyttä sekä pienentää huokostilavuutta ja siten vesipitoisuutta. Maasto-olosuhteissa maan painuminen esikuormituksen alla on hitaampaa kuin laboratorio-olosuhteissa, koska huokosvesi joutuu kulkemaan pidemmän matkan erilaisista kuivatusolosuhteista johtuen. (esim. Hebib & Farrell 2003; Åhnberg 2006; Skels et al. 2013.)

Edellä on esitetty, että stabiloidun maan lujuuteen vaikuttavat stabiloitavan maan ominaisuudet, sideaineresepti sekä sekoitus- ja lujittumisolosuhteet. Tämä on usein tilanne myös stabiloituvuustestauksessa, jossa stabiloidun maan lujuus määritetään pääasiassa yksiakσιαalisella puristuskokeella. Lujuuteen vaikuttavat kuitenkin myös esimerkiksi maassa vallitseva jännitystaso, maan kyllästysaste sekä se, tapahtuuko kuormitus suljetussa vai avoimessa tilassa. Tarkoissa lujuuden ja painumaominaisuuksien määrittelyissä nämäkin tekijät tulisi huomioida. Åhnbergin (2006) väitöskirjassa tutkittiin savien ja liejun lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia hyvin monipuolisesti. Yksiakσιαalisten puristuskokeiden lisäksi tehtiin kolmiakσιαali- ja ödometrikokeita. Åhnbergin (2006) mukaan stabiloidun maan lujuutta voidaan kuvata samoin määritetyillä lujuusparamet-

reilla kuin luonnontilaisella maalla. Stabiloidun maan suljettu ja avoin leikkauslujuus ovat riippuvaisia vallitsevasta jännitustilasta samoin kuin luonnontilaisessa maassa.

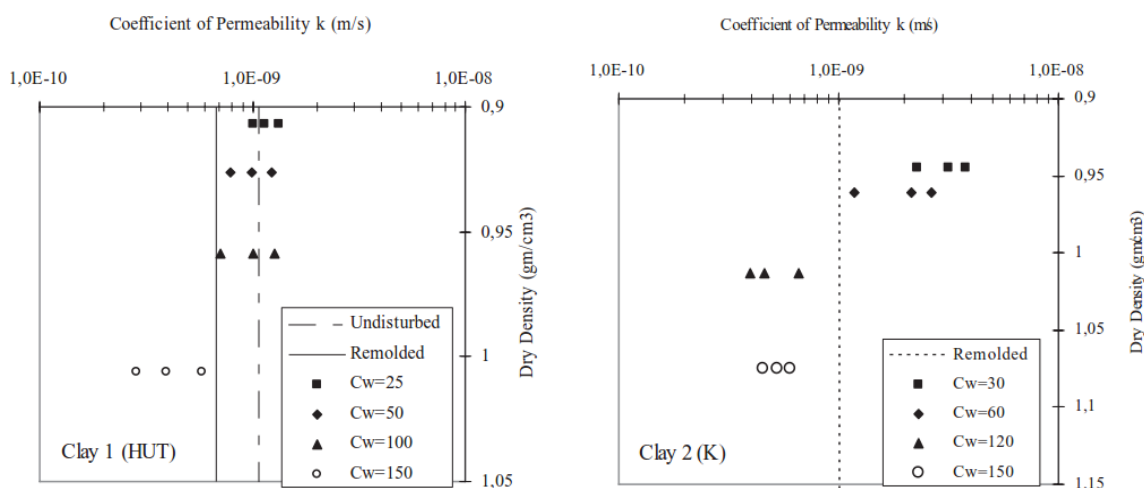
Stabiloitu maa ei ole käytännössä koskaan täysin kyllästynyttä. Laboratorio-olosuhteissa stabiloidut savet eivät yleensä ole kosketuksissa veden kanssa. Maasto-olosuhteissa kyllästysaste voi vaihdella merkittävästi. Jos stabiloitu maa ei ole täysin kyllästyneessä tilassa, tapahtuu sen kuormitus osittain avoimessa tilassa, sillä huokosveden ylipaine tasaantuu osittain huokosissa olevan ilman kokoonpuristuksessa. Tämän vuoksi epätäydellinen kyllästyminen kasvattaa suljetun tilan leikkauslujuutta. Åhnberg (2006) toteaa, että laboratoriossa valmistettujen koekappaleiden kyllästysaste on 93 - 96 % plastisilla savilla ja 96 - 98 % turpeilla, joiden vesipitoisuus on suuri ja käytetty sideainemäärä noin 200 kg/m^3 .

Lujille ($q_u > 300 \text{ kPa}$) koekappaleilla tehdyissä kolmi- ja yksiaksiaalikokeissa havaittiin, että yksiaksiaalinen puristuskoe antoi korkeampia lujuuksia kuin kolmiaksiaalikoe. Tätä alhaisemmilla lujuustasoilla yksiaksiaalisella puristuskokeella ja kolmiaksiaalikokeella saaduissa ljuuksissa ei ollut merkittäviä eroja. Kolmiaksiaalikokeessa stabiloitu maa on kyllästyneessä tilassa toisin kuin yksiaksiaalisessa puristuskokeessa. Koska maasto-olosuhteissa stabiloidun maan kyllästysaste yleensä kasvaa ajan myötä, antaa yksiaksiaalinen puristuskoe liian suuria ljuustuloksia. (Åhnberg 2006.)

3.3.4 Vedenläpäisevyys

Suomalaisten savien vedenläpäisevyys on usein valmiiksi pieni, mutta stabiloinnilla vedenläpäisevyyttä voidaan yhä pienentää, kun maan käsiteltävyys ja tiivistettävyyys paranevat. Vedenläpäisevyys voi vaikuttaa stabiloidun maan huokosvedenpaineen kehittymiseen kuormituksessa, mikä voi kuormitusnopeudesta riippuen vaikuttaa siihen, tapahtuuko kuormitus suljetussa vai avoimessa tilassa. Lisäksi vedenläpäisevyys vaikuttaa maan konsolidoitumiseen kuorman alla. Vedenläpäisevyys vaikuttaa myös esimerkiksi stabiloidusta maasta liukenevien aineiden määrään sekä muutoksiin pohjavedenpinnassa, jos paineellisen pohjaveden painetaso laskee. (Åhnberg 2006.)

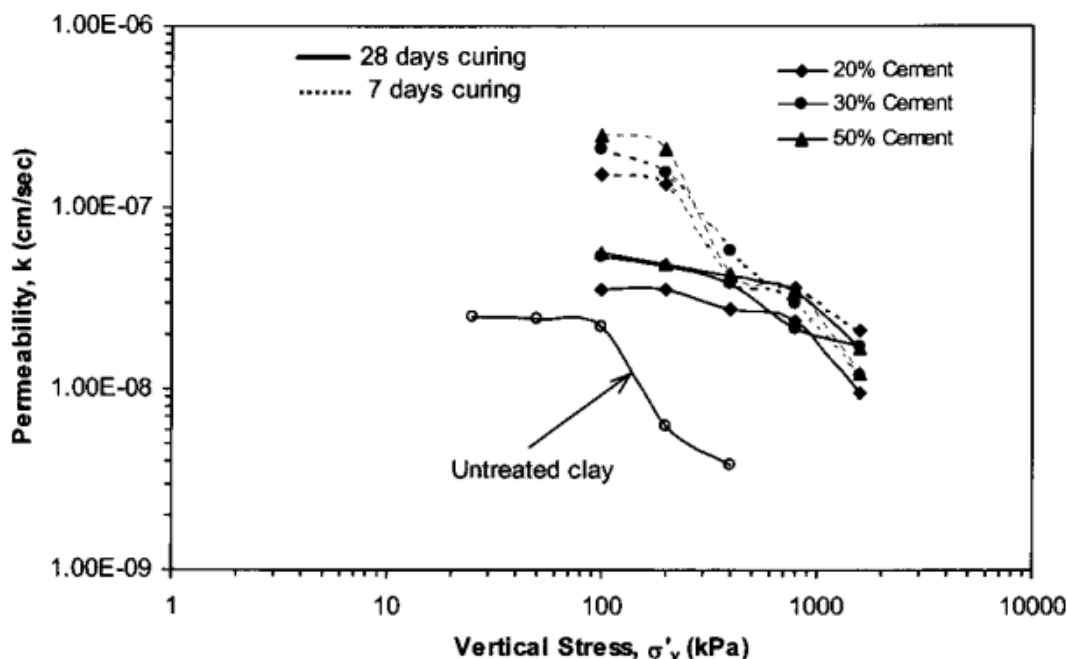
Hassanin & Ravaskan (2009) tutkimuksessa suomalaisten sementillä stabiloitujen saven (Clay 1 & 2, vrt. luku 3.3.1) vedenläpäisevyydet kasvoivat hieman pienillä sementtimäärillä, mutta pienenivät suuria sementtimääriä käytettäessä (kuva 22).



Kuva 22: Kahden suomalaisen saven (Clay 1 & Clay 2) alkuperäiset vedenläpäisevyydet sekä vedenläpäisevyydet eri sementtimäärien lisäyksen jälkeen suhteessa kuivairtotiheyteen (28 d). Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty alkuperäinen vedenläpäisevyys häiriintymättömässä ja häirityssä maassa (undisturbed & remolded). (Hassan & Ravaska 2009.)

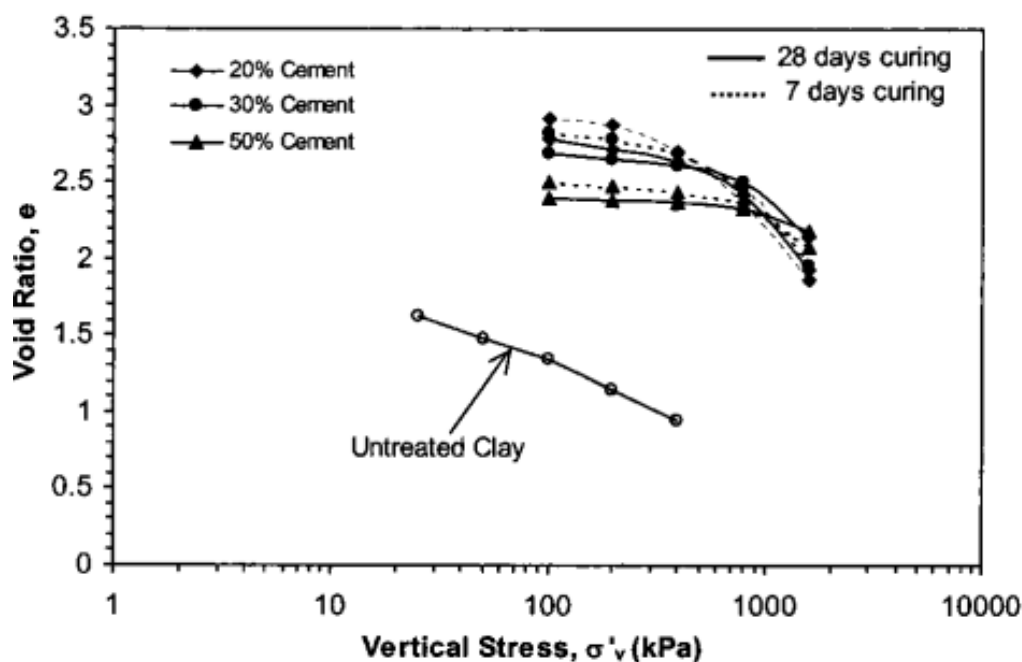
Sen sijaan liejuisen saven (Clay 3 / LV) vedenläpäisevyys pieneni pienilläkin sementtimäärillä. Vedenläpäisevyys kasvoi kaikissa tapauksissa suhteessa kuivairtitiheyden kasvuun. Hassan & Ravaska esittävät, että pehmeän, hyvin vesipitoisen saven vedenläpäisevyys kasvaa tai pysyy alkuperäisellä tasolla 28 vuorokauden kuluessa stabiloinnista, jos käytetty sementtimäärä ei ylitä tiettyä kynnysarvoa. Kynnysarvon ylittyttyä vedenläpäisevyys pienenee alkuperäiseen arvoon nähden. Tuloksissa on esitetty saven alkuperäinen vedenläpäisevyys sekä häirityssä että häiriintymättömässä tilassa, koska saven vedenläpäisevyys on usein pienempi häirityssä tilassa kuin luonnontilaisena.

Chew'n et al. (2004) tutkimuksessa sementtistabiloidun saven vedenläpäisevyys kasvoi stabiloinnin jälkeen, mutta pieneni ajan kuluessa (kuva 23). Vedenläpäisevyyksiä tarkasteltiin 7 ja 28 vuorokauden iässä. Vaikka vedenläpäisevyys oli 28 vuorokauden iässä pienempi kuin 7 vuorokauden iässä, oli vedenläpäisevyys yhä suurempi kuin stabiloimattomassa savessa.



Kuva 23: Saven vedenläpäisevyys suhteessa pystysuuntaiseen jännitykseen ennen stabiilointia sekä sen jälkeen 7 ja 28 vuorokauden iässä (Chew et al. 2004).

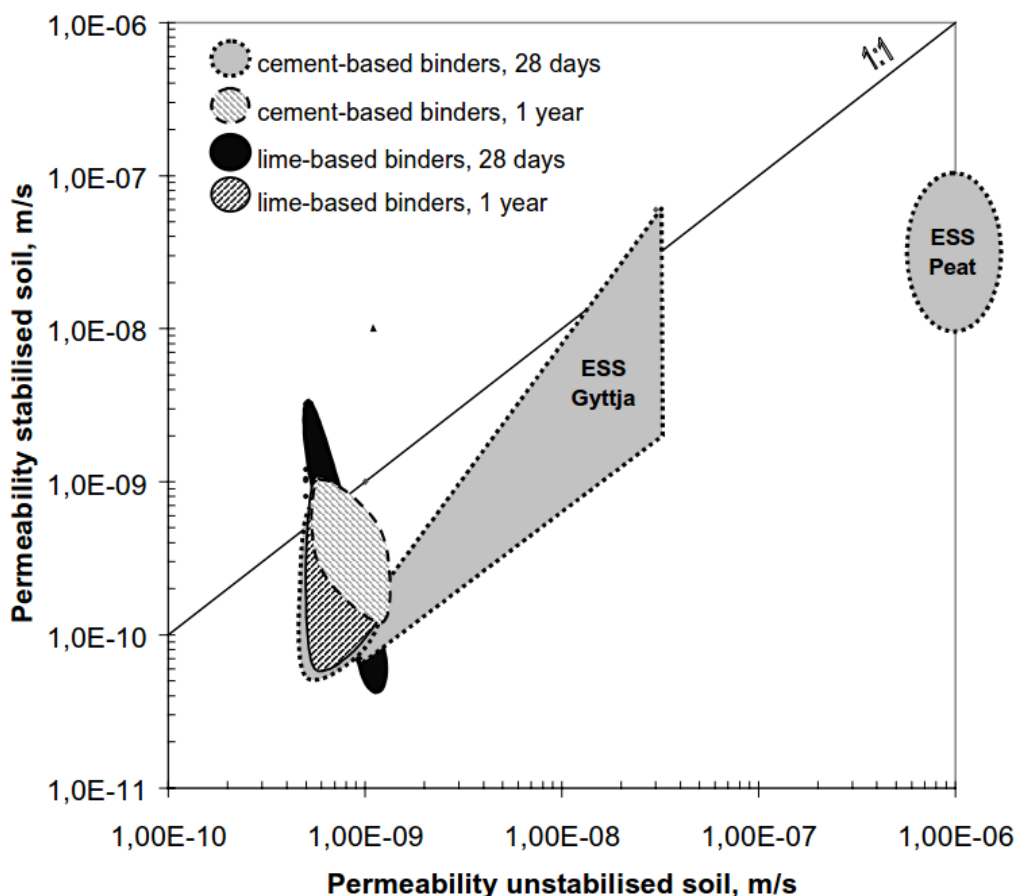
Kuvasta havaitaan, että 7 vuorokauden iässä määritetyt vedenläpäisevyydet ovat suurempia kuin 28 vuorokauden iässä määritetyt vedenläpäisevyydet, ja että nämä vedenläpäisevyyden arvot ovat herkempiä kuorman vaikutukselle kuin 28 vuorokauden iässä määritetyt arvot. Chew et al. (2004) esittävät syyksi maan flokkuloitunutta rakennetta, joka on selvästi huokoisempi kuin alkuperäinen saven rakenne (kuva 24). Tämä johtuu sideaineen aiheuttamista muutoksista kaksoisdifфуusiokerroksessa. Huokoinen rakenne kokoonpuristuu kuormituksessa, mikä voidaan havaita kuvasta 23. Kun syntyneet huokokset täyttyvät ajan myötä reaktiotuotteilla, maan lujuus kasvaa ja kokoonpuristuvuus pienenee, eikä kuormitus vaikuta yhtä paljon myöskään vedenläpäisevyyteen.



Kuva 24: Sementtistabiloidun saven huokoisuus suhteessa tehokkaaseen pystyjännitykseen (Chew et al. 2004).

Etenkin kalkilla stabiloitaessa vedenläpäisevyys usein kasvaa aluksi, sillä maan flokkuloituminen muuttaa maan rakennetta läpäisevämmäksi. Esimerkiksi Rajasekaran & Rao (2002) raportoivat, että kalkilla pilaristabiloidun merisedimentin vedenläpäisevyys kasvoi 15-kertaiseksi alkuperäiseen verrattuna. Tämän vuoksi kalkkipilareita voidaan käyttää pystyjojina. Locat et al. (1996) havaitsivat, että kalkkistabiloidun kanadalaisen saven (merisedimentti) vedenläpäisevyys kasvoi, kun kalkin määrä oli alle 2 %. Sen sijaan yli 5 % kalkkipitoisuuksissa vedenläpäisevyys pieneni alkuperäiseen verrattuna. Ilmiö voidaan selittää huokosia täyttävien reaktiotuotteiden vähäisellä määrällä pieniä sideainemääriä käytettäessä. Kalkki muuttaa maan rakennetta, mutta reaktiotuotteet täyttävät syntyviä huokosia, jolloin vedenläpäisevyys voi pienentyä riittävän suuria sideainemääriä käytettäessä. Lopputulos riippuu kuitenkin myös maan mineraaleista ja niiden reagoivuudesta kalkin kanssa, sillä kalkkistabiloinnissa reaktiotuotteet muodostuvat potsolaanireaktioissa. Jos reaktiotuotteita on riittävästi, voi vedenläpäisevyys olla pienempi kuin ennen stabilointia (Little 1995).

Kuvassa 25 on esitetty eri sideaineilla stabiloitujen ruotsalaisten savien, liejujen ja turpeen vedenläpäisevyyksiä 28 ja 365 vuorokautta stabiloinnin jälkeen suhteessa stabilointia edeltäviin vedenläpäisevyyksiin. Osa tuloksista on EuroSoilStab-hankkeesta (ESS). Kun vedenläpäisevyyksiä tarkasteltiin pitkän lujittumisajan jälkeen, muuttivat eri sideaineet vedenläpäisevyyksiä samansuuntaisesti. Kalkilla stabiloidun maan vedenläpäisevyyksissä oli silti eniten hajontaa. Kuvassa esitettyjen sideainetyyppien lisäksi lentotuhkan ja masuunikuoman havaittiin vaikuttavan vedenläpäisevyyteen samoin. (Åhnberg 2006.) Myös kipsin on havaittu pienentävän vedenläpäisevyyttä (EuroSoilStab 2002).



Kuva 25: Stabiloinnin jälkeen määritettyjen vedenläpäisevyyksien hajonta suhteessa alkuperäisiin vedenläpäisevyyksiin. ESS = EuroSoilStab-hankkeen tulokset. (Åhnberg 2000 & 2006).

Vedenläpäisevyyden pieneneminen stabiloitaessa liittyy maan huokostilavuuden sekä vesipitoisuuden pienenemiseen. Åhnberg (2006) esittää, että maan vedenläpäisevyyden pieneneminen voidaan siksi yhdistää maan lujuuden kasvuun. Hänen mukaansa vedenläpäisevyys pienenee karkeasti kymmenesosan, kun maan lujuus kasvaa 600 kPa. Vedenläpäisevyyden ja lujuuden välinen yhteys liittyy lujuutta lisäävien reaktiotuotteiden määrän kasvuun, jolloin maan huokostilavuus pienenee. Toisaalta jo aiemmin mainitussa Rajaserkaranin & Raon (2002) tutkimuksessa kalkilla pilaristabiloidun merisedimentin vedenläpäisevyys kasvoi 15-kertaiseksi alkuperäiseen verrattuna samanaikaisesti, kun maan lujuus kasvoi 10-kertaiseksi.

EuroSoilStab-hankkeessa (2002) havaittiin, että pitkän lujittumisajan kuluessa vedenläpäisevyydessä ei tapahdu merkittäviä muutoksia. Esimerkiksi eri sideaineilla stabiloidun turpeen vedenläpäisevyys oli noin 10^{-9} - 10^{-8} m/s riippumatta siitä, tehtiinkö määrittäminen 28 vai 180 vuorokautta stabiloinnin jälkeen. Brandl'n (1999) tutkimuksessa tarkasteltiin sementillä ja kalkilla stabiloitujen savien ominaisuuksia pitkän ajan kuluttua stabiloinnista. Vedenläpäisevyyksissä havaittiin pieniä muutoksia jopa kymmeniä vuosia stabiloinnin jälkeen, ja etenkin jos savi sisälsi paljon monikerroksisia savimineraaleja, ja kalkin määrä oli suuri.

Hebib & Farrell (2003) tutkivat viidellä sideaineella stabiloituja kahta irlantilaista turvetta ja havaitsivat, että turpeiden vedenläpäisevyys pysyi alkuperäisellä tasolla tai pieneni hieman. Tutkimuksessa myös havaittiin, että esikuormituksen aikainen jännitystaso vaikutti merkittävästi saavutettavaan vedenläpäisevyyteen, ja suuria jännityksiä käytettäessä vedenläpäisevyys oli pienin. Tutkittavat turpeet olivat maatuneisuudeltaan von Postin asteikolla H2 ja H6 - H9 ja niiden vesipitoisuudet olivat noin 1200 % ja 900 %. Käytetyt sideaineet olivat sementti, lentotuhka, masuunikuona, kalkki sekä kipsi. Ali et al. (2010) havaitsivat, että turpeen vedenläpäisevyys muuttui alkuperäistä pienemmäksi käytettäessä sementin ja masuunikuonan seosta sideaineena sekä hiekkaa fillerinä. Turpeen esikuormitus vaikuttaa merkittävästi vedenläpäisevyyden muutokseen (esim. Hebib & Farrell 2003; Åhnberg 2006; Skels et al. 2013).

Laboratoriossa ja maasto-olosuhteissa saavutettavat vedenläpäisevyydet voivat poiketa toisistaan merkittävästi. Maasto-olosuhteissa sekoitustyön homogeenisuus sekä stabiloidun maan kuormitus vaikuttavat saavutettavaan vedenläpäisevyyteen. Tämän vuoksi laboratoriossa saavutettuja vedenläpäisevyyden arvoja voidaan pitää alarajana, ja maastossa saavutettava vedenläpäisevyys on todennäköisesti suurempi. (Åhnberg, 2006) Saven vedenläpäisevyyteen vaikuttaa myös sen kuivumiskutistuminen ja sen aiheuttamat halkeamat. Kuivumiskutistuminen vähenee saven konsistenssin muuttuessa stabiloitautsa kohti kiinteää. (Kezdi 1979.)

4 LABORATORIOTUTKIMUKSET

Laboratoriotutkimusohjelmassa tutkittiin yhteensä kuutta maanäytettä. Tutkimusohjelma on jaettu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa kolmea savea, yhtä liejua ja kahta turvetta stabiloitiin eri sideaineresepteillä siten, että stabiloidun maan lujuus vastasi tyyppillisiä pohjanvahvistuksessa tavoiteltavia lujuuksia. Tätä tutkimusohjelmaa kutsutaan työssä pohjanvahvistusohjelmaksi. Toisessa osassa stabiloitiin ensimmäisessäkin ohjelmassa käytettyä savea lentotuhkalla. Ohjelmassa tavoiteltiin runkoaineen kiinteytystä sekä käsiteltävyyden paranemista ja häiriintymisherkkyiden vähenemistä. Tässä ohjelmassa lujuustavoite oli pienempi kuin pohjanvahvistusohjelmassa. Ohjelmaa kutsutaan työssä kiinteytetyn saven tutkimusohjelmaksi.

Runkoaineiden luokitus- ja geoteknisiä ominaisuuksia määritettiin ennen stabilointia, jotta stabiloinnin aiheuttamia muutoksia maassa voitiin arvioida. Runkoaineita stabiloitiin erilaisilla sideaineresepteillä. Stabiloinnin ja eripituisten lujittumisaikojen jälkeen tehtiin luokituskokeita ja geoteknisiä laboratoriomääriä. Laboratoriotutkimusten tavoitteena oli arvioida stabiloinnin aiheuttamia muutoksia maassa suhteessa runkoaineeseen, sideainereseptiin sekä lujittumisaikaan.

4.1 Laboratoriotutkimuksissa käytetyt runkoaineet

Stabiloinnin runkoaineena käytettiin kolmea savinäytettä, yhtä savista liejunäytettä sekä kahta turvenäytettä. Runkoaineiksi pyrittiin valitsemaan ominaisuuksiltaan toisistaan mahdollisimman paljon eroavia näytteitä tutkimusohjelman kattavuuden takaamiseksi. Osa runkoaineista oli vanhoissa stabiloituvuustestausprojekteissa käytettyjä, ja nämä runkoaineet valittiin niiden ennestään tunnettujen luokitusominaisuuksien vuoksi. Osa näytteistä oli tätä tutkimusta varten hankittuja, eikä niiden luokitusominaisuuksia tunnettu etukäteen.

4.1.1 Savet ja lieju

Runkoaineina käytettyjen saven ja liejun luokitusominaisuuksista määritettiin vesipitoisuus (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-1:fi), tilavuuspaino (GLO-85), hehkutushäviö (SFS-EN 1997-2 5.6), raekokojakauma (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-4:fi) sekä juoksuraja ja kieritysraja (plastisuusraja) (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-12:fi ja GLO-85). Luokitusominaisuuksia on esitetty taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 3: Savien ja liejun luokitusominaisuuksia.

Runkoaine	Vesipitoisuus [%]	Tilavuuspaino [kN/m³]	Hehkutushäviö [%]	Rakeisuus
Honkasuo Sa	47,9	17,1	1,8	laSa
Koirapuisto Sa	102	14,2	3,5	liSa
Kuohijoki Sa	44,3 ^{*)}	17,1 ^{*)}	2,9	liSa
Koirapuisto Lj	87,0	14,3	8,7	saLj/ljSa

^{*)} arvo veden lisäyksen jälkeen.

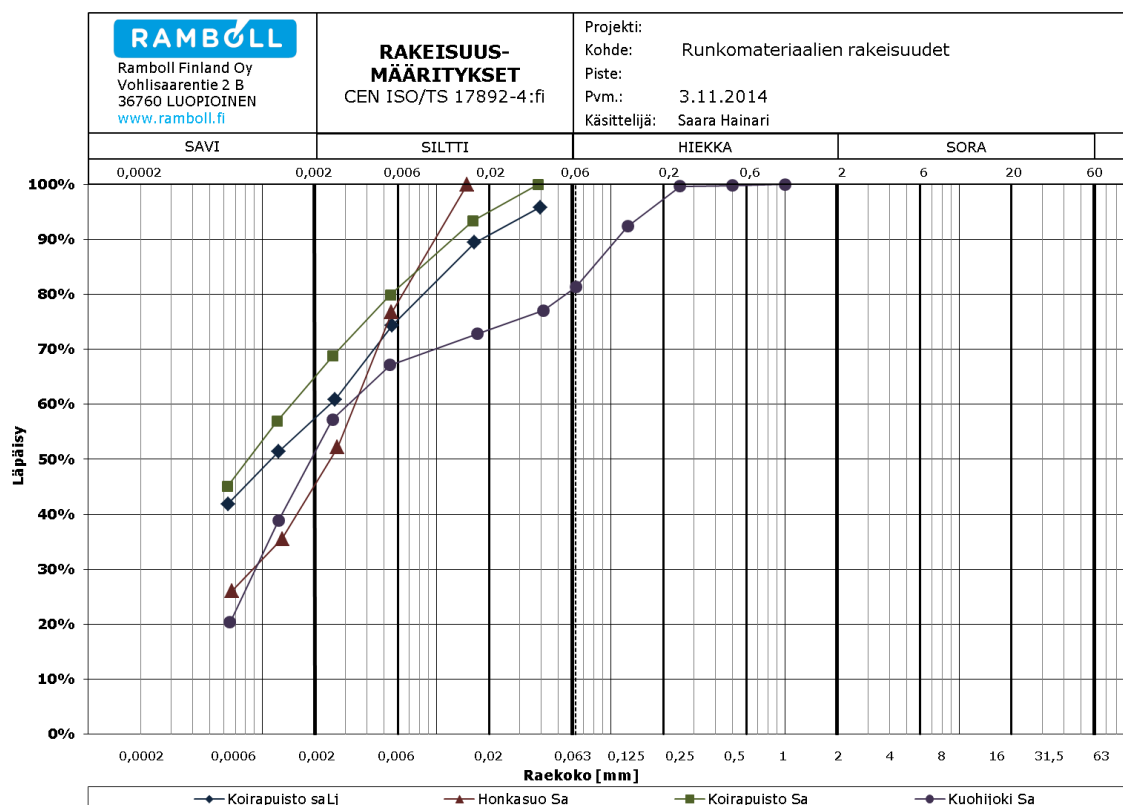
Runkomateriaaleista kaksi oli lihavvia savia, yksi laiha savi ja yksi savinen lieju. Savinen lieju oli humuspitoisuudeltaan hyvin lähellä liejuista savea. Erotukseksi muista savista tätä runkomateriaalia kutsutaan työssä liejuksi.

Taulukko 4: Savien ja liejun konsistenssirajat.

Runkoaine	Juoksuraja [%]	Plastisuusraja (juoksuraja) [%]
Honkasuo Sa	32,8	23,1
Koirapuisto Sa	71,0	26,0
Kuohijoki Sa	40,2	28,1
Koirapuisto Lj	106	57,4

Perkkaan koirapuiston (Koirapuisto) ja Honkasuon savet olivat häirittyinä juoksevassa konsistenssissa. Kuohijoen savi oli luonnontilaiselta vesipitoisuudeltaan kiinteässä konsistenssissa. Saven luonnontilainen vesipitoisuus oli noin 20 %. Saveen lisättiin vettä, sillä se oli luonnontilaisena liian kuivaa ja jäykkää stabiloitavaksi. Lisäyksen jälkeen savi oli juoksevassa konsistenssissa, joskin sen vesipitoisuus oli melko lähellä plastisen konsistenssin vesipitoisuutta. Koirapuiston lieju oli luonnontilaiselta vesipitoisuudeltaan plastisessa konsistenssissa.

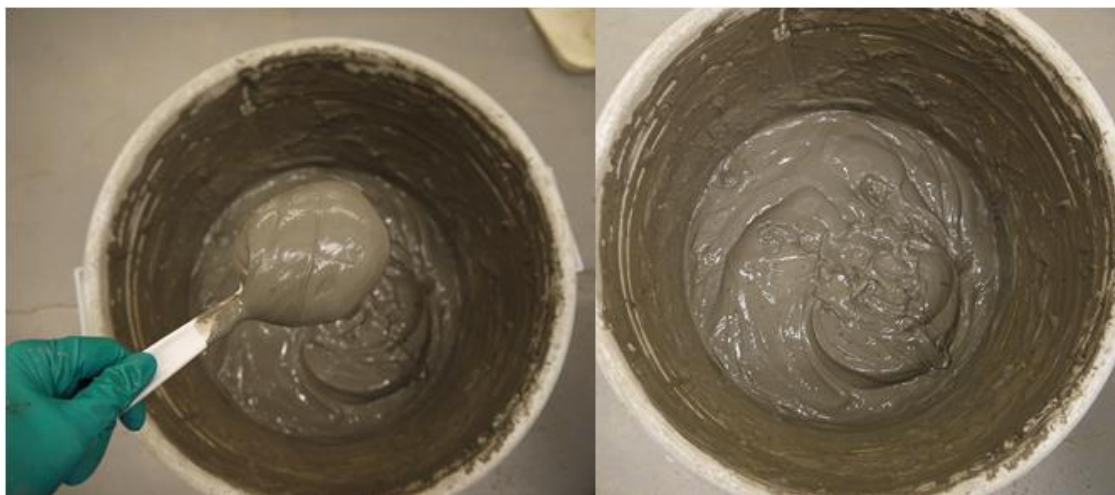
Savisten runkomateriaalien raekokojakaumat on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26: Savisten runkomateriaalien rakeisuuskäyrät.

Rakeisuuskäyristä havaitaan, että Kuohijoen savi sisälsi muista materiaaleista poiketen noin 20 % hiekkaa. Runkoainesta Koirapuiston savi sisälsi eniten savilajitetta (<0,002 mm ainesta noin 65 %) ja Honkasuon savi vähiten (<0,002 mm ainesta noin 46 %).

Kuvissa 27 ja 28 on esitetty Honkasuon ja Koirapuiston saven olomuoto luonnontilaisessa vesipitoisuudessa homogenisoinnin jälkeen. Kuvista havaitaan hyvin Honkasuon ja Koirapuiston savien juokseva olomuoto homogenisoinnin jälkeen. Näytteet on häiritetty täydellisesti homogenisoinnilla, joten kuvat eivät vastaa luonnontilaista häiriintymättömistä tilaa.



Kuva 27: *Honkasuon savi.*

Honkasuon saven luonnontilainen vesipitoisuus oli 47,9 %, ja sen juoksurajaksi määritettiin 32,8 %. Saven plastisuusraja oli 23,1 %. Juoksurajan ja plastisuusrajan erotus $I_p = 9,7$, eli runkomateriaali oli vähän plastista.



Kuva 28: *Koirapuiston savi*

Koirapuiston saven luonnontilainen vesipitoisuus oli 102 %. Juoksurajaksi määritettiin 71 % ja plastisuusrajaksi 26 %. Savi oli erittäin plastista ($I_p = 45$).

Kuvissa 29 ja 30 on esitetty Kuohijoen saven ja Koirapuiston liejun olomuoto alkupe-
räisessä vesipitoisuudessa homogenisoinnin jälkeen. Kuvista havaitaan, että nämä run-
koaineet olivat Koirapuiston ja Honkasuon savia kiinteämmässä konsistenssissa.



Kuva 29: Kuohijoen savi.

Kuohijoen saveen lisättiin vettä. Lisäyksen jälkeen saven vesipitoisuus oli 44,3 %. Juoksurajaksi määritettiin 40,2 % ja plastisuusrajaksi 28,1 %. Savi oli vähän plastista ($I_p = 12,1$).



Kuva 30: Koirapuiston lieju (saLj).

Koirapuiston liejun (saLj) luonnontilainen vesipitoisuus oli 87,0 %. Liejun juoksuraja oli 106 % ja plastisuusraja 57,4 %. Runkoaine oli erittäin plastista ($I_p = 48,4$).

Runkoaineista määritettiin suljettu leikkauslujuus häirityssä tilassa kartiokokeella (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-12:fi). Leikkauslujuudet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Häirittyjen runkoaineiden suljetut leikkauslujuudet.

Runkoaine	Häirityn näytteen suljettu leikkauslujuus s_{ur} [kPa]
Honkasuo Sa	0,22
Koirapuisto Sa	0,26
Kuohijoki Sa	1,27
Koirapuisto Lj	10,49

Taulukosta nähdään, että runkoaineiden suljettu leikkauslujuus häirityssä tilassa oli erittäin pieni lukuun ottamatta Koirapuiston liejun suljettua leikkauslujuutta, joka oli selvästi muita suurempi. Kuohijoen savien suljettu leikkauslujuus määritettiin veden lisäyksen jälkeen.

Honkasuon, Koirapuiston ja Kuohijoen savien vedenläpäisevyyskertoimet määritettiin juostavaseinäisellä vedenläpäisevyyskokeella (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-11:fi). Tulokset on esitetty luvussa 5.

4.1.2 Turpeet

Runkoaineina käytettyjen turpeiden luokitusominaisuuksista määritettiin vesipitoisuus (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-1:fi), tilavuuspaino (GLO-85), hehkutushäviö (SFS-EN 1997-2 5.6) sekä maatuneisuus. Nämä on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6: Turpeiden luokitusominaisuudet.

Runkoaine	Vesipitoisuus [%]	Tilavuuspaino [kN/m ³]	Hehkutushäviö [%]	Maatuneisuus
Tv / Honkasuo	793	10,0	89,7	MTv (H8)
Tv / Hämeenlinna	779	9,9	93,0	MTv (H9)

Taulukosta havaitaan, että runkoaineina käytetyt turpeet ovat luokitusominaisuuksiltaan melko samankaltaiset keskenään. Kuvassa 31 on esitetty Honkasuon turpeen alkuperäinen olomuoto homogenisoinnin jälkeen. Kuvasta havaitaan, että turve oli maatunutta. Maatuneisuusaste oli von Postin asteikolla H8.

*Kuva 31: Honkasuon turve.*

Kuvassa 32 on esitetty Hämeenlinnan turpeen alkuperäinen olomuoto homogenisoinnin jälkeen. Myös Hämeenlinnan turve oli maatunutta, joskin se oli von Postin asteikolla hieman maatuneempaa kuin Honkasuon turve (H9).



Kuva 32: Hämeenlinnan turve.

Honkasuon turpeen vedenläpäisevyyskerroin määritettiin juostavaseinäisellä vedenläpäisevyyskokeella (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-11:fi). Kummankin turpeen painumaominaisuudet ennen stabilointia määritettiin. Vedenläpäisevyys ja painumaominaisuudet on esitetty luvussa 5.

4.2 Savien ja liejun pohjanvahvistustutkimusohjelma

4.2.1 Käytetyt sideainereseptit

Runkoaineiden stabiilituvuutta eri sideaineilla ja -määrillä tarkasteltiin alustavasti ennakkokokeilla. Kokeiden perusteella määritettiin varsinaiset testauksessa käytetyt sideainereseptit. Honkasuon savea stabiloitiin poltetun kalkin ja Plussementin seoksella (KC), GTC:llä sekä Plussementillä (CEM II 42,5 N, lyhenne PlusSe). Kalkin ja Plussementin sekoitussuhde oli 3:7. Käytetty kalkki oli Nordkalkin poltettua kalkkia (CaO). Nordkalk Terra GTC on kaupallinen sideaine, joka sisältää sammutettua kalkkia (Ca(OH)₂), sementtiä ja kipsiä. Jokaista sideainetta käytettiin testauksessa useampana eri määränä (kg/m³). Sideainemäärät on laskettu suhteessa maan märkämasaan. Käytetyt sideainereseptit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7: Honkasuon saven sideainereseptit

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m³]
Sa / Honkasuo	KC (3:7)	50
		70
		100
	GTC	50
		70
		100
	PlusSe	30
		50
		70

Taulukossa 8 on esitetty Koirapuiston saven stabiloinnissa käytetyt sideainereseptit. Sideaineina käytettiin kalkin ja Plussementin seosta (3:7) ja Plussementtiä.

Taulukko 8: Koirapuiston sideainereseptit

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m³]
Sa / Koirapuisto	KC (3:7)	70
		90
	PlusSe	50
		70

Taulukossa 9 on Kuohijoen saven stabiloinnissa käytetyt sideainereseptit. Sideaineina käytettiin Plussementtiä, Plussementin ja lentotuhkan (lyhenne LT) seoksia, GTC:tä sekä kalkin Plussementin seosta suhteessa 3:7. Lentotuhka oli Helsingin Hanasaaren lentotuhkaa (kivihiilen polton lentotuhka, voimalaitos B).

Taulukko 9: Kuohijoen saven sideainereseptit

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m³]
Sa / Kuohijoki	PlusSe	40
		60
		80
	PlusSe + LT	40 + 75
		40 + 150
		60 + 75
	GTC	40
		60
		80
	KC (3:7)	60

Taulukossa 10 ovat Koirapuiston liejun stabiloinnissa käytetyt sideainereseptit. Sideaineina käytettiin Plussementtiä, Plussementin ja lentotuhkan (Hanasaaren kivihiilen polton lentotuhka) seoksia, GTC:tä sekä kalkin Plussementin seosta (3:7).

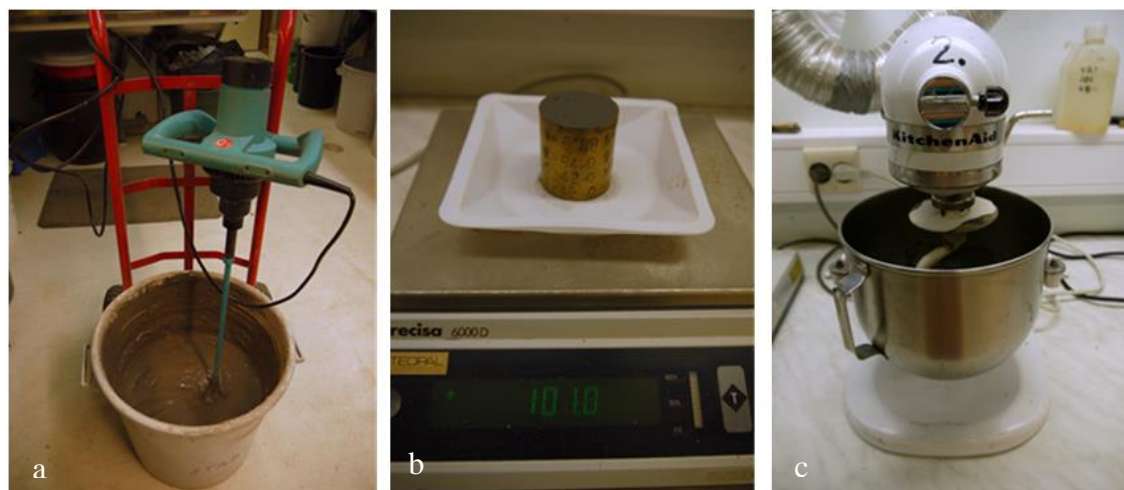
Taulukko 10: Koirapuiston liejun sideainereseptit

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m ³]
Lj / Koirapuisto	PlusSe	80
		100
		130
	PlusSe + LT	80 + 75 80 + 150
	GTC	130
	KC (3:7)	130

Lujittuneista 7 - 180 vrk:n ikäisistä koekappaleista määritettiin puristuslujuus, vesipitoisuus, tilavuuspaino ja penetrometrillä kärkivastus. Lisäksi tehtiin juoksu- ja plastisuusrajan määrittämiä määrittämiin soveltuvista seoksista. Vedenläpäisevyys määritettiin neljästä seoksesta.

4.2.2 Koekappaleiden valmistus

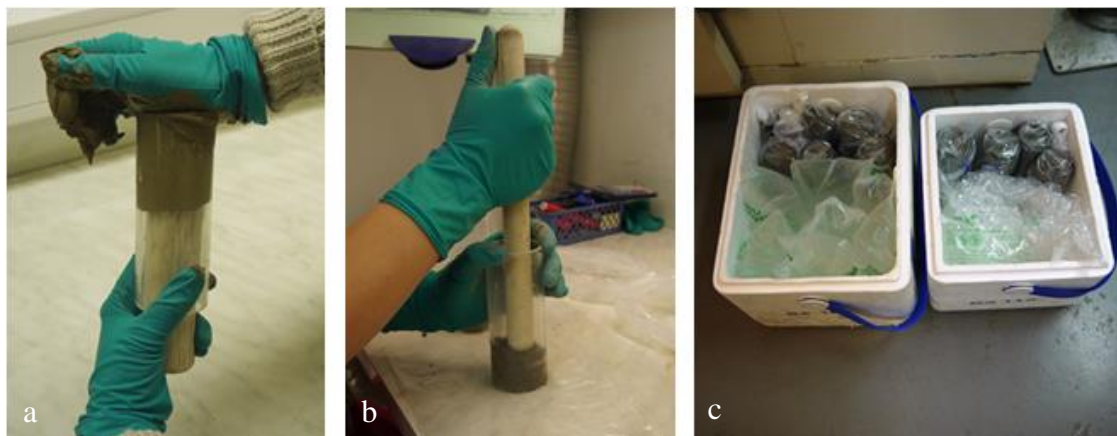
Koekappaleiden valmistusta varten runkoaineet homogenisoitiin huolellisesti laastinsekoittimella. Homogenisointi toistettiin sekoituserien välillä. Runkoaineen tiheys määritettiin, jotta saatiin sideaineen määrä sideaineen kuivamassana maan märkätilavuutta kohti (kg/m³). Sideaine ja massa sekoitettiin keskenään 2 minuutin vakiotyöllä yleiskoneella. Ensimmäisen minuutin jälkeen massan sekoittuminen sekoitusastian pohjalla varmistettiin kääntelemällä massaa käsin. Yhdestä sekoituserästä valmistettiin kolme koekappaletta. Kuvassa 33 on esitetty edellä kuvatut työvaiheet.



Kuva 33: Savisten koekappaleiden valmistus osa 1: a) runkoaineen homogenisointi, b) runkoaineen tiheyden määrittäminen, c) runkoaineen ja sideaineen sekoitus.

Sekoitettu massa sullottiin sisähalkaisijaltaan 42 mm muoviputkiin. Massa sullottiin koekappaleputkiin vastakappaletta käyttäen. Koirapuiston lieju sullottiin puutankoa käyttäen, koska stabiloitu massa oli kuivaa ja jäykkää. Vastakappaletta käyttäen massaa

ei olisi saanut putkeen tiiviisti. Koekappaleita ei kuitenkaan varsinaisesti tiivistetty. Kuvissa 34 a ja b on esitetty stabiloidun massan sullonta vastakappaleella ja puutangolla.



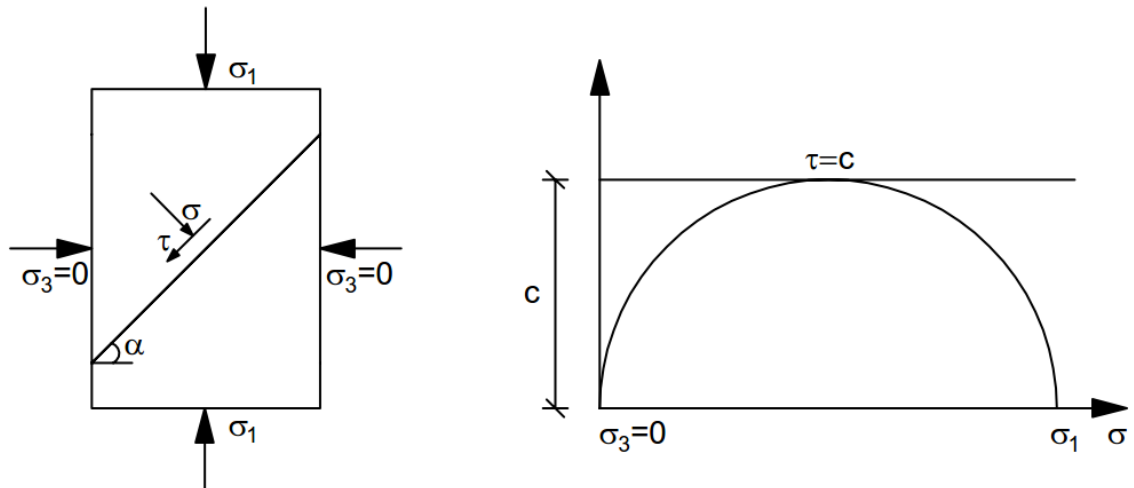
Kuva 34: Savisten koekappaleiden valmistus osa 2: a) sekoitetun massan sullonta vastakappaleen avulla, b) massan sullonta puutangolla, c) valmiita koekappaleita kylmälaukuissa.

Koekappaleputket suljettiin kahteen päällekkäiseen muovipussiin, joiden väliin laitettiin kosteaa paperia. Näin estettiin veden haihtuminen koekappaleista säilytyksen aikana. Pusseissa olevat putket varastoitiin kylmälaukuissa (kuva 34 c). Koekappaleita säilytettiin 2 vuorokautta huoneenlämmössä, minkä jälkeen ne siirrettiin kylmiöön $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan. Eri sideaineilla valmistetut koekappaleet varastoitiin eri kylmälaukkuihin, sillä eri sideaineiden lujittumisreaktioissa vapautuu eri määriä lämpöä.

4.2.3 Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuus määritettiin yksiaksisiaalisella puristuskokeella. Se on yksinkertaistettu tapaus kolmiaksisiaalikokeesta. Yksiaksisiaalisessa puristuskokeessa sylinterin muotoista koekappaletta kuormitetaan tasaisesti pystysuuntaisella voimalla, jolloin koekappaleeseen aiheutuu pystysuuntainen pääjännitys σ_1 . Vaakasuuntaiset pääjännitykset puuttuvat ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$). Kuormitusta jatketaan kunnes koekappale murtuu. Tällöin puristava voima ja sitä vastaava pystysuuntainen pääjännitys saavuttavat maksimiarvonsa. Maksimipuristusjännitys σ_1 on maan puristuslujuus q_u . Mikäli selkeää murtumista ei tapahdu, tulkitaan murtojännitykseksi 10 % suhteellista muodonmuutosta vastaava puristusjännitys. (Rantamäki et al. 2004.)

Puristuskokeen aiheuttamaa jännitystilaa murtotilassa on havainnollistettu kuvassa 35.



Kuva 35: Jännitystila puristuskokeessa murtotilanteessa (Rantamäki et al., 2004, muokattu).

Vaakasuuntaisen pääjännityksen σ_3 puuttuessa murtotilaa vastaava jännitysympyrä kulkee origon kautta. Ympyrän halkaisija on murtotilaa vastaava pääjännitys σ_1 . Jos maanäyte otaksutaan puhtaaksi koheesiomaalajiksi, leikkauslujuuden kuvaajasuora voidaan kuvata vaakasuorana jännitysympyrää sivuavana tangenttina, koska maan kitkakulma $\phi = 0$. Saven ja liejun lisäksi maatunut turve voidaan olettaa koheesiomaalajiksi, koska sen lujuus muodostuu pääasiassa koheesiosta. Puhtaan koheesiomaan tulisi leikkautua tasossa $\alpha = 45^\circ$. (Rantamäki et al. 2004.)

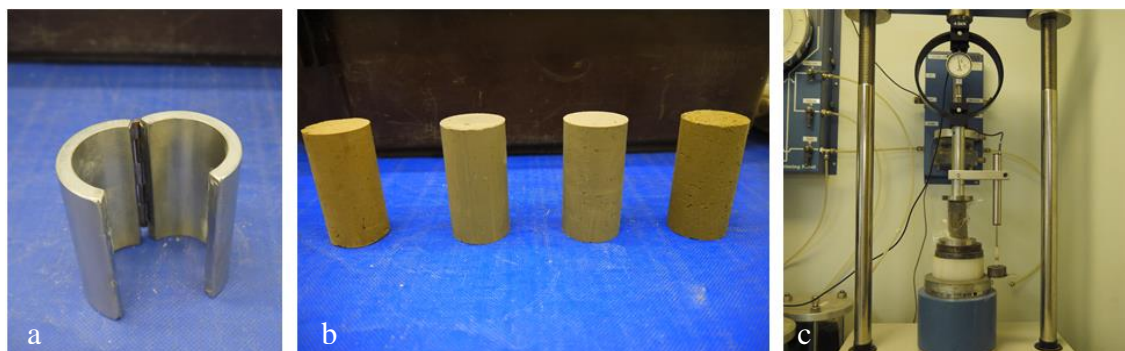
Jännitysympyrän geometrian vuoksi maan leikkauslujuudeksi saadaan kaavalla 8:

$$s_p = c = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2}, \quad (8)$$

jossa

s_p	leikkauslujuus puristuskokeella [kPa]
c	koheesio [kPa]
σ_1	pystysuuntainen pääjännitys [kPa]
q_u	puristuslujuus puristuskokeella [kPa]

Yksiaksaalinen puristuslujuus määritettiin mukaillen standardia SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-7:fi. Lujittuneet koekappaleet tunkattiin ulos muovisista koekappaleputkista. Koekappaleet tasattiin määrämittaan kuvassa 36 a olevan muotin avulla. Puristuskoekappaleen kumpikin pää tasattiin huolellisesti, jotta puristimen kuormitus kohdistui tasaisesti koko kappaleeseen. Valmis puristuskoekappale suljettiin muovipussiin siten, ettei pussi puristanut kappaletta. Kuvassa 36 b on esitetty valmiita puristuskoekappaleita.



Kuva 36: Savisten koekappaleiden puristuslujuuden määrittäminen: a) puristuskoeleikkien tasoittamiseen käytetty 84 mm korkuinen muotti, b) valmiita puristuskoeleikkeitä, c) koekappale yksiaksiaalisessa puristuskokeessa.

Valmis puristuskoeleikkaus kuormitettiin murtoon, tai mikäli selkeää murtoa ei havaittu, 15 % muodonmuutokseen asti yksiaksiaalisella puristuskoelaitteella (kuva 36 c). Kuormitus tehtiin vakionopeudella 1 mm/min.

4.2.4 Kimmomoduulin E_{50} määrittäminen

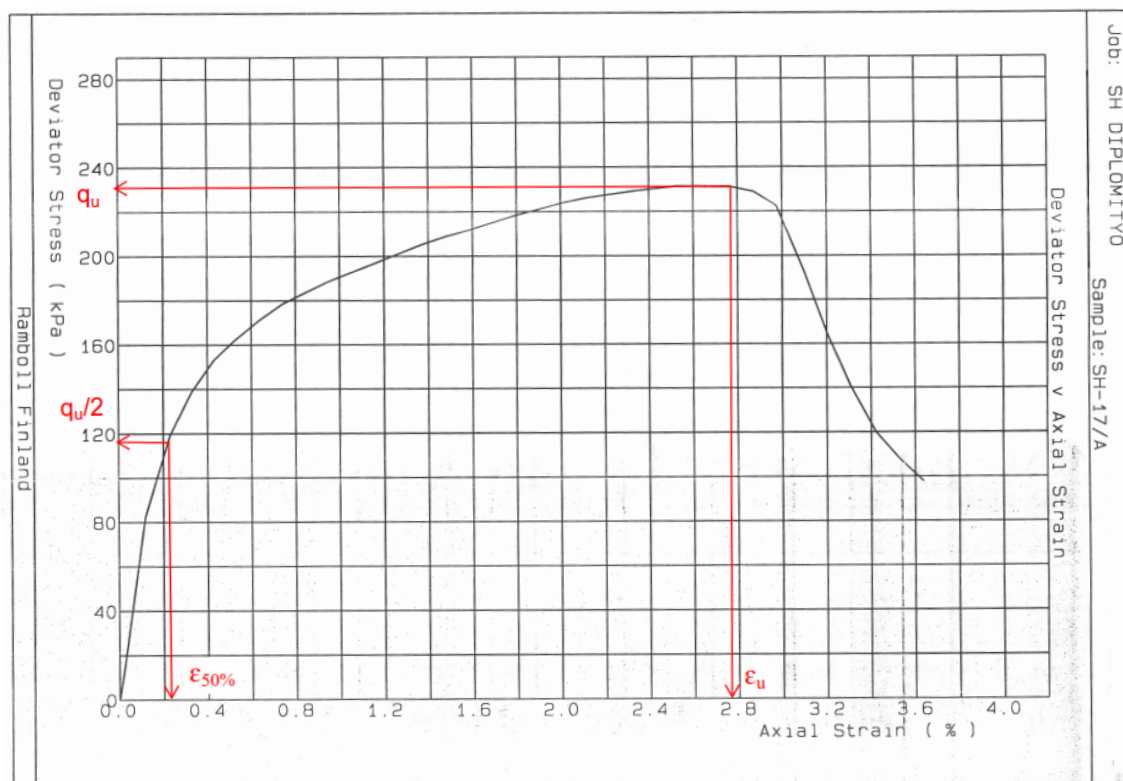
Kimmomoduuli E_{50} määritetään puristuskokeesta saatavasta jännitys-muodonmuutoskuvaajasta. Kimmomoduuli on jännityksen ja sitä vastaavan muodonmuutoksen suhde. Sillä kuvataan maan jäykkyyttä eli kykyä vastustaa muodonmuutosta. Yksiaksiaalisen puristuskokeen yhteydessä kimmomoduuli määritetään yleensä sekanttimoduulina puristusjännityksen, joka vastaa 50 % maksimipuristusjännitystä, ja sitä vastaavan muodonmuutoksen suhteena. Kimmomoduuli E_{50} voidaan määrittää kaavalla 9.

$$E_{50} = \frac{q_u/2}{\varepsilon_{50\%}}, \quad (9)$$

jossa

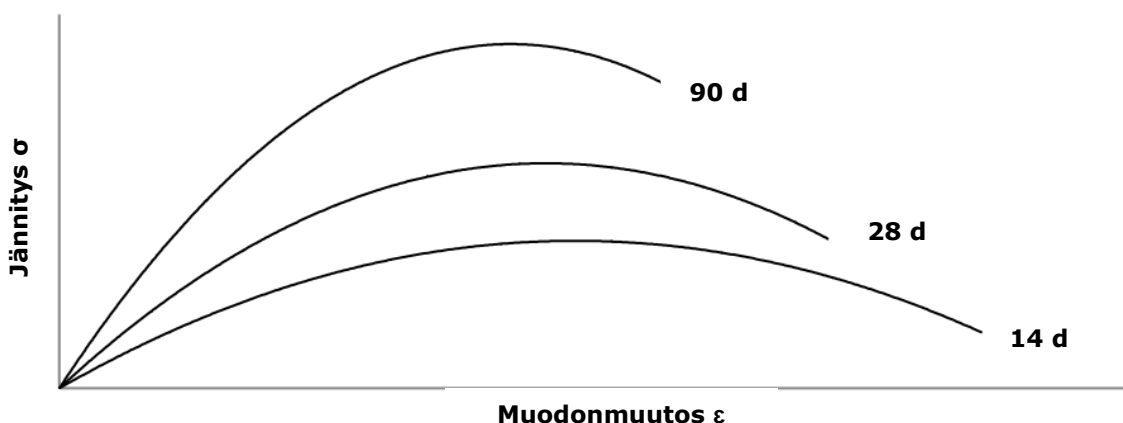
E_{50}	kimmomoduuli [kPa]
q_u	puristuslujuus [kPa]
$\varepsilon_{50\%}$	puristuslujuuden puolikasta vastaava muodonmuutos [%]

Esimerkki kimmomoduulin E_{50} graafisesta määrittämisestä jännitys-muodonmuutoskuvaajasta on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37: Kimmomoduulin E_{50} määrittäminen jännitys-muodonmuutoskuvaajasta.

Jännitys-muodonmuutoskuvaajan muoto muuttuu yleensä aikalujuutuksen myötä siten, että puristuslujuus kasvaa ja murtotilan muodonmuutos pienenee (kuva 38). Tämä havaitaan jännitys-muodonmuutoskäyrän jyrkkeydenä. Maan jäykkyys ja kimmomoduuli kasvavat. (Kiviniemi et al. 2012.)



Kuva 38: Aikalujuutuksen vaikutus jännitys-muodonmuutoskäyrän muotoon (Kiviniemi et al. 2012).

Kimmomoduuli E_{50} määritettiin kaikille puristuskoekappaleille. Moduuli määritettiin puristuslujuuden määrittämisen yhteydessä tulostetusta raakadatasta.

4.2.5 Penetrometrimäärittäminen

Käsitteellisesti penetrometrillä voidaan arvioida suuntaa-antavasti maa-aineksen lujuutta. Laitetta on käytetty stabilointityön laadunvalvontaan, ja sillä saaduista mittaustuloksista on voitu arvioida stabiloidun maan lujuuskehitystä. Tulokset ovat kuitenkin olleet suhteellisia, eli eri tuloksia on vertailtu toisiinsa suhteessa esimerkiksi lujittumisaikaan tai sideainereseptiin. Penetrometrillä on siis arvioitu lujuudessa tapahtuvaa kehitystä tai muutosta, ei absoluuttisia lujuuksia. Penetrometrimäärittäysten tavoitteena tässä työssä oli arvioida määrittämyksen soveltuvuutta stabiloidun maan lujuuden arviointiin karkealla tasolla esimerkiksi maasto-olosuhteissa, joissa puristuskokeiden tekeminen ei ole mahdollista. Määrittäminen on huomattavasti helpompi ja nopeampi kuin puristuslujuuden määrittämiseen yleensä käytetty yksiaksiaalinen puristuskoe.

Penetrometrin kartiomainen kärki painetaan tasaisella voimalla maahan, jolloin laitteen sisällä oleva jousi puristuu. Jousen puristumaa mitataan millimetreinä. Valmistaja on määrittänyt penetrometrin jousille jousivakiot. Kun jousen jousivakio, kokoonpuristuma ja kärjen pinta-ala tunnetaan, kärkivastus voidaan laskea kaavalla 10.

$$q_c = \frac{F}{A} = \frac{k_j * x}{A}, \quad (10)$$

jossa

q_c	kärkivastus [N/cm ²]
F	puristamiseen käytetty voima [N]
A	kärjen pinta-ala [cm ²]
k_j	jousivakio [N/cm]
x	jousen kokoonpuristuma [cm]

Työssä käytettiin Eijkelkampin valmistamaa penetrometriä, jonka malli oli Hand penetrometer for top layers, type IB (tuotekoodi 6.06). Penetrometrissä oli kaksi halkaisijaltaan ja kärkikulmaltaan erikokoista kärkeä, kolme erikokoista joustaa sekä runko mitta-asteikkoineen. Kuvassa 39 a on esitetty penetrometrilaitteisto ja kuvassa 39 b penetrometrimäärittämyksen suorittaminen saviselle koekappaleelle.



Kuva 39: Saven ja liejun penetrometrimääritys: a) penetrometrilaitteisto, b) stabiloidun savikoekappaleen penetrometrimääritys.

Penetrometrimääritystä varten putkessa olevasta koekappaleesta leikattiin noin 1 cm pituinen pala pois, ja koekappaleen pinta tasoitettiin. Määritys tehtiin koekappaleputkessa. Putki tuki koekappaletta sivuilta, jolloin kappale ei päässyt laajenemaan sivusuunnassa. Koekappaleen alapää tuettiin siten, ettei kappale päässyt liikkumaan putkessa alaspäin.

4.2.6 Vesipitoisuuden ja tilavuuspainon määrittäminen

Vesipitoisuus lasketaan näytteestä kuivauksessa haihtuneen veden ja kuivamassan suhteena kaavalla 11.

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} * 100\%, \quad (11)$$

jossa

w	vesipitoisuus [%]
m_w	märkämassa [g]
m_d	kuivamassa [g]

Vesipitoisuus määritettiin standardin SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-1:fi mukaisesti. Puristuslujuuden määrittämisen jälkeen puristuskoekappale ja siitä mahdollisesti erottunut vesi siirrettiin punnittuun astiaan. Astia ja koekappale punnittiin, ja koekappaletta kuivattiin uunissa 105 °C lämpötilassa, kunnes koekappaleen massa ei enää muuttunut.

Tilavuuspaino lasketaan maan painon ja tilavuuden suhteena kaavalla 12.

$$\gamma = \frac{m * g}{V}, \quad (12)$$

jossa

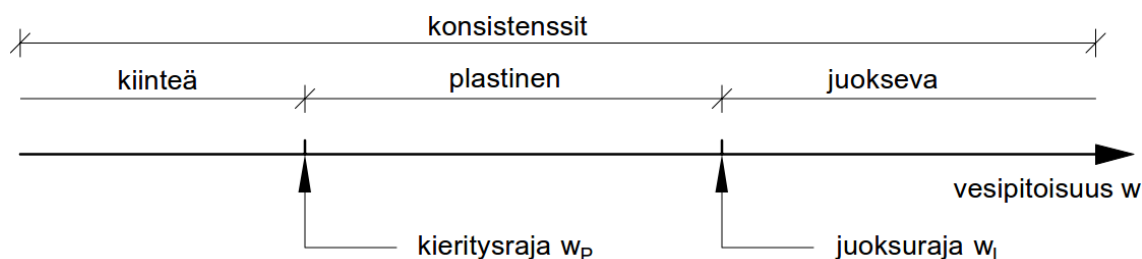
γ	maan tilavuuspaino [kN/m ³]
m	maan massa luonnontilaisena [g]

g	putoamiskiihtyvyyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)
V	maan tilavuus [cm^3]

Tilavuuspaino määritettiin GLO-85 mukaan. Määritys tehtiin puristuskoekappaleen muotoilun yhteydessä. Valmiin puristuskoekappaleen tilavuus tunnettiin (muotin tilavuus), ja valmis puristuskoekappale punnittiin ennen puristuslujuuden määrittystä.

4.2.7 Konsistenssirajojen määrittäminen

Maa esiintyy häirittyinä kolmessa konsistenssissa, jotka ovat kiinteä, plastinen ja juokseva konsistenssi. Maan konsistenssin aiheuttavat sen rakeisuus, vesipitoisuus, maan mineraalikoostumus sekä maan sisältämä orgaaninen aine. Konsistenssirajoilla (Atterbergin rajat) kuvataan maan eri olomuotojen välisiä vesipitoisuusrajoja. Vesipitoisuutta, jossa maa muuttuu kiinteästä konsistenssista plastiseksi eli muovailtavaksi, kutsutaan plastisuus- eli kierityksrajaksi. Vesipitoisuus, jossa maa muuttuu plastisesta juoksevaksi, tunnetaan juoksurajana. Maan konsistenssia ja konsistenssirajoja on havainnollistettu kuvassa 40.



Kuva 40: Maan konsistenssi ja konsistenssirajat (Rantamäki & al., 2004, muokattu).

Plastisen konsistenssin vesipitoisuusalueen laajuutta kuvataan juoksurajan ja kierityksen eli plastisuusrajan erotuksena plastisuusluvulla (kaava 13).

$$I_P = w_L - w_P, \quad (13)$$

jossa

I_P	plastisuusluku
w_L	juoksuraja [%]
w_P	kierityksraja (plastisuusraja) [%]

Maa luokitellaan vähän plastiseksi, mikäli sen plastisuusluku on ≤ 10 , kohtalaisen plastiseksi mikäli luku on $10 - 25$ ja erittäin plastiseksi, kun erotus on > 25 . Plastisuusluku kertoo siis sen, kuinka laajalla vesipitoisuusalueella koheesiomaa on muokattavassa, plastisessa muodossa. (Rantamäki et al. 2004.) Yleensä plastisuusluku on sitä laajempi mitä hienorakeisempaa maa on (Ronkainen 2012).

Konsistenssia voidaan kuvata myös konsistenssiluvulla I_c ja juoksevuusindeksillä I_L (kaavat 14 ja 15).

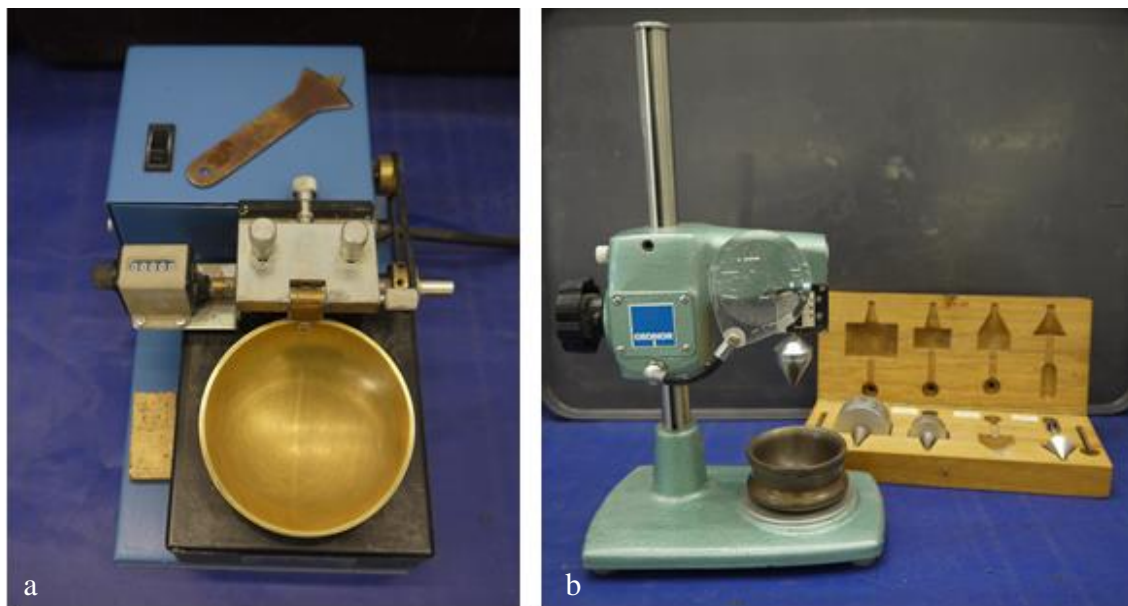
$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} \quad (14)$$

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (15)$$

Konsistenssiluvulla saven ja siltin konsistenssia kuvataan asteikolla hyvin pehmeä - pehmeä - kova - jäykkä - hyvin jäykkä. Konsistenssiluku ei kuitenkaan kerro suoranaisesti maan lujuudesta, sillä maa-ainekset, joilla on sama konsistenssiluku, eivät välttämättä ole yhtä lujia keskenään. Juoksevuusindeksillä arvioituna maa on plastista, kun $0 < I_L < 1$. (Suomen geoteknillinen yhdistys 2012.) Maan konsistenssiin liittyy myös maan tilavuuden pieneneminen siirryttäessä juoksevasta konsistenssista kohti kiinteää konsistenssia. Plastisuusrajaa pienemmässä vesipitoisuudessa konsistenssi voidaan yhä jakaa puolikiinteään ja kiinteään. Vesipitoisuus, jossa maa muuttuu puolikiinteästä kiinteäksi, on kutistumispiste. Maan tilavuus ei enää muutu kutistumisrajaa pienemmässä vesipitoisuudessa. (Lojander 1985.)

Maan konsistenssi ja plastisuusominaisuudet määritetään juoksurajan osalta Casagranden koputuskokeella (juoksuraja) tai kartiokokeella (hienousluku) ja plastisuusrajaa osalta kierityskokeella. Hienousluku vastaa karkeasti juoksurajaa, ja sitä suositellaan ISO-luokituksessa juoksurajan määrittämiseen. GEO-luokituksessa juoksuraja määritetään koputuskokeella. (Suomen geoteknillinen yhdistys 2012.)

Juoksuraja määritettiin pääasiassa Casagranden koputuskokeella. Lisäksi tehtiin muutamia hienousluvun määrittämiä kartiokoelaitteella. Casagranden koputuskoe valittiin pääasialliseksi määrittäytavaksi, koska määrittäykset tehtiin stabiloiduille materiaaleille, ja hienousluvun määrittäyksessä käytetään luonnontilaisille maa-aineksille määrittätyjä vertailulukuja (vertailuluku a). Hienousluvun määrittäyksillä pyrittiin arvioimaan koputuskokeella saatujen juoksurajojen tarkkuutta, sekä vertailemaan määrittäytapojen soveltuvuutta stabiloiduille maa-aineksille. Casagranden koputuskoe tehtiin GLO-85 mukaan ja hienousluvun määrittäyt CEN ISO/TS 17892-12:fi mukaan. Casagranden koputuskoeelaitteisto sekä kartiokoelaitteisto on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41: Juoksurajan ja hienousluvun määrittämiseen käytetyt laitteet: a) Casagranden koputuskoelaitteisto, b) kartiokoelaitteisto.

Casagranden koputuskokeella saatava juoksuraja on se vesipitoisuus, jossa näytteeseen tehty määrämuotoinen ura sulkeutuu 25 koputuksella 13 mm matkalta. Kartiokokeella määritettävä hienousluku on 60 g kartion 10 mm painumaa vastaava vesipitoisuus. (Rantamäki et al. 2004.)

Määrittämiä varten koekappaleet hienonnettiin käsin, ja niihin lisättiin tai niistä haihdutettiin vettä. Kaikkiin koekappaleisiin lukuun ottamatta kiinteätetyn saven testausohjelman materiaaleja jouduttiin lisäämään vettä, jotta vesipitoisuus saatiin määrittämisalueelle. Veden lisäyksen jälkeen näytettä sekoitettiin useasti, ja vesipitoisuuden annettiin tasaantua ennen määrittämistä. Hyvin lujien koekappaleiden (puristuslujuus ≥ 200 kPa) määrittäminen oli epätarkkaa tai sitä ei tehty, koska koekappaleen hienontaminen ja siten homogeenointi täydellisesti oli mahdotonta.

Plastisuusraja (kierityusraja) määritettiin kierityskokeella (SFS 179-2). Plastisuusraja on se vesipitoisuus, jossa savesta kieritetty 3 mm paksuinen rihma ei enää pysy koossa. (Rantamäki et al. 2004.) Määrittämisessä käytettiin juoksurajan määrittämistä varten hienonnettua ja kostutettua maa-ainesta.

4.2.8 Vedenläpäisevyyden määrittäminen

Veden virtaus hiekassa tai sitä hienommassa maassa on laminaarista eli pyörteetöntä ja noudattaa Darcyn lakia kaavan 16 mukaisesti:

$$v = k * i = k * \frac{H}{L}, \quad (16)$$

jossa

v	veden virtausnopeus [m/s]
k	vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
i	hydraulinen gradientti H/L [m/m]
H	painekorkeus, vesipatsaan korkeus [m]
L	suotomatka [m]

Maan vedenläpäisevyydellä tarkoitetaan tietyssä aikayksikössä tietyn poikkileikkauksen läpi virtaavan veden määrää. Vakiopainekokeen vedenläpäisevyys voidaan laskea kaavalla 17.

$$k = \frac{Q * L}{A * H}, \quad (17)$$

jossa

k	vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
Q	näytteen läpi virrannut vesimäärä [m ³ /s]
L	näytteen korkeus eli suotomatka [m]
A	näytteen pinta-ala [m ²]
H	painekorkeus [m]

Vedenläpäisevyyden määritykset tehtiin joustavaseinämäisenä vakiopainekokeena (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-11:fi). Joustavaseinäinen vedenläpäisevyyskoelaitteisto koostuu näytesellistä sekä etupainesellistä ja takapainesellistä (kuva 42 c). Etupaineselliin synnytetään takapaineselliä suurempi paine. Näin luodaan hydraulinen gradientti eli paine-ero, joka aiheuttaa veden virtauksen etupainesellistä takapaineselliin näytteen läpi. Vesi kulkee koekappaleessa alhaalta ylöspäin.

Näytesellissä vallitsee sellipaine, joka on etu- ja takapainetta suurempi. Tällöin sellipaine puristaa vedenläpäisykoekappaletta ympäröivää kumikalvoa koekappaletta vasten, jolloin seinämävirtauksia ei synny. Sellissä vaikuttava tehokas jännitys on sellipaineen ja etu- ja takapaineen keskiarvon välinen erotus. Tehokas jännitys siis kuvaa koekappaleen keskellä vaikuttavaa nettojännitystilaa. Tehokas jännitys valitaan vastaamaan sellaista jännitystilaa, jota määrittämisellä pyritään simuloimaan. Määrittämisen aikana paineita ja hydraulista gradienttia nostetaan, kunnes läpivirranneen veden määrä ei enää kasva. Tehokas jännitys säilytetään samana. Usein luotettavia tuloksia saadaan vasta suurella gradientilla, koska pienellä gradientilla läpivirtaava vesimäärä on liian pieni luotettavaan mittaukseen.

Vedenläpäisevyyden määrittystä varten Honkasuon, Koirapuiston ja Kuohijoen savia stabiloitiin Plussementillä. Taulukossa 11 on esitetty käytetyt sideainereseptit.

Taulukko 11: Saven vedenläpäisevyyskokeiden sideainereseptit.

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m ³]
Sa / Honkasuo	PlusSe	50
Sa / Koirapuisto		50
Sa / Kuohijoki		60

Stabiloitu massa sullottiin halkaisijaltaan 103 mm muotteihin. Massan annettiin lujittua kylmiössä 28 tai 90 vuorokautta. Säilytysolosuhteet vastasivat puristuskoekappaleiden säilytystä. Lujittuneet koekappaleet muotoiltiin noin 100 mm korkuisiksi ja punnittiin. Myös kappaleiden tarkka halkaisija määritettiin. Kuvassa 42 on esitetty vedenläpäisevyyden määrittämisen työvaiheita.



Kuva 42: Vedenläpäisevyyden määrittäminen: a) vedenläpäisevyysmuotteja ja sullontanuija, b) valmiita vedenläpäisevyyskoekappaleita, c) vedenläpäisevyyskoelaitteisto.

Valmiit koekappaleet siirrettiin vedenläpäisevyyskoeselleihin, ja ne kyllästettiin kyllästyspaineessa ja -gradientissa. Koekappaleen kyllästyttyä selli-, etu- ja takapaine ja edelleen gradientti nostettiin halutulle tasolle. Tehokkaana jännityksenä käytettiin 20 kPa. Gradienttia nostettiin kokeen aikana portaittain, kunnes läpi virtaavan veden määrä taantui.

4.3 Turpeiden pohjanvahvistustutkimusohjelma

4.3.1 Käytetyt sideainereseptit

Honkasuon turvetta stabiloitiin Plussementillä kolmella sideainemäärällä ja Plussementin ja lentotuhkan seoksella kolmella sideainemäärällä. Lentotuhka oli Helsingin Hana-saaren lentotuhkaa (kivihiilen polton lentotuhka, voimalaitos B). Sementin ja lentotuhkan suhde sideaineseoksessa vaihteli. Hämeenlinnan turvetta stabiloitiin Plussementillä kolmella sideainemäärällä ja Plussementin ja lentotuhkan (Hanaaari B, kivihiilen lentotuhka) seoksella kahdella sideainemäärällä. Käytetyt sideainereseptit on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12: Turpeiden stabiloinnissa käytetyt sideainereseptit.

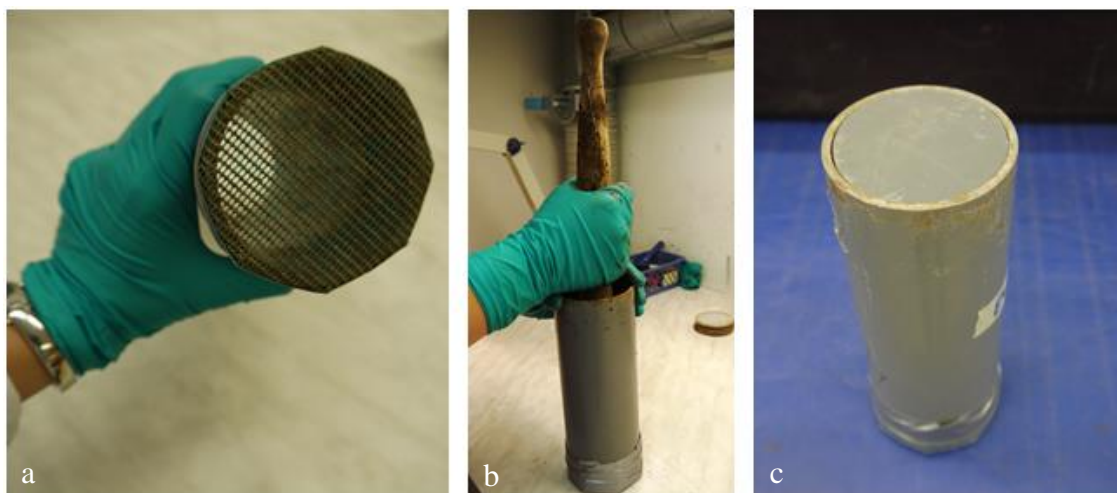
Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m ³]
Tv / Honkasuo	PlusSe	100
		120
		140
	PlusSe + LT	100 + 100
		100 + 200
		120 + 100
Tv / Hämeenlinna	PlusSe	80
		100
		130
	PlusSe + LT	80 + 100
		100 + 100

Lujittuneista 7 - 180 vrk:n ikäisistä koekappaleista määritettiin puristuslujuus, vesipitoisuus, tilavuuspaino ja penetrometrilujuus. Esikuormituksen aikana määritettiin koekappaleiden kokoonpuristuma. Vedenläpäisevyys määritettiin yhdestä seoksesta.

4.3.2 Koekappaleiden valmistus

Turpeet homogenisoitiin kuten saviset runkoaineet. Runkoaineen tiheys määritettiin samoin kuin savella, tosin määrittäessä käytettiin suurempaa muottia tuloksen edustavuuden parantamiseksi. Runkoaineen tiheyden avulla määritettiin yhteen sekoituserään tarvittava sideainemäärä massana runkoaineen tilavuutta kohti.

Koekappaleet valmistettiin samoin kuin savi- ja liejukoekappaleet. Koekappaleputki oli savi- ja liejukoekappaleista poiketen sisähalkaisijaltaan 68 mm ja korkeudeltaan 200 mm. Putki oli toisesta päästään verkolla suljettu. Yhdestä sekoituserästä valmistettiin kolme koekappaletta. Sullontatyö tehtiin vastakappaleen sijaan puunuijalla. Täysi koekappaleputki suljettiin hieman sisähalkaisijaa pienemmällä kannella. Turvekoekappaleiden valmistusvaiheita on esitetty kuvassa 43.

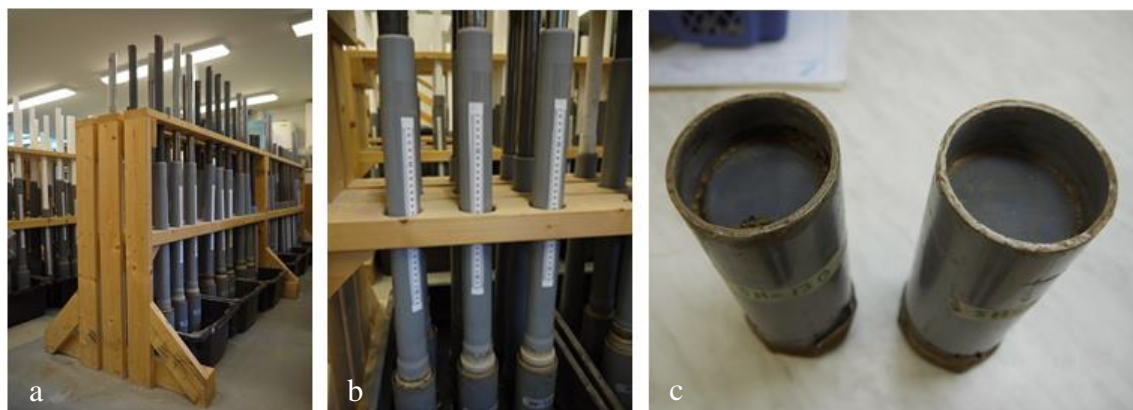


Kuva 43: Turvekoekappaleiden valmistus: a) toisesta päästä verkotettu koekappaleputki, b) stabiloidun massan sullonta puunuijalla, c) valmis koekappale ja kansi.

Jokainen koekappale pyrittiin sullomaan vakiotyömäärällä. Koekappaleet sullottiin kerroksittain pieniä kertamassaeriä käyttäen. Yhdestä sekoituksesta saatavat kolme koekappaleetta sullottiin vuorotellen kerrosten välillä sullottavaa putkea vaihtaen. Näin pyrittiin ehkäisemään stabiloidun massan lujittuminen sekoituserän ensimmäisen ja viimeisen koekappaleen sullonnan välillä.

4.3.3 Koekappaleiden esikuormitus

Valmiit koekappaleputket esikuormitettiin esikuormituspenkeissä. Esikuormituspenkissä koekappaleputket ovat verkotetusta alapäästään vedessä. Koekappaleiden päällä on massaltaan 6,5 kg paino, joka aiheuttaa 18 kPa jännityksen koekappaleisiin. Koekappaleiden päällä oleva kansi pääsee liikkumaan putkessa, jolloin stabiloitu massa painuu kuorman alla. Turvekoekappaleiden kokoonpuristumaa arvioidaan esikuormituksen aikana tapahtuvan painuman ja turvekoekappaleen alkuperäisen korkeuden suhteenä. Esikuormitus tehdään huoneenlämmössä. Kuvissa 44 a ja b on esitetty käytetyt esikuormitusjärjestelyt.



Kuva 44: Turpeen esikuormitus: a) esikuormituspenkki, b) painuman mitta-asteikko, c) esikuormitettuja turvekoekappaleita.

Esikuormitus vastaa noin 1 metrin esikuormituspengertä. Koekappaleiden painumista painon alla seurattiin esikuormituspenkkien mitta-asteikosta. Kokoonpuristuma määritettiin 1, 3, 7 ja 28 vuorokauden päästä kuormituksen aloituksesta, ja sen jälkeen 28 vuorokauden välein koestukseen asti. Kuvassa 44 c on esitetty esikuormituksessa painuneita turvekoekappaleita.

4.3.4 Puristuslujuuden määrittäminen

Puristuslujuuden määrittämistä varten esikuormitettu koekappale tunkattiin ulos koekappaleputkesta. Tunkattu koekappale tasattiin muotin avulla 136 mm korkuiseksi. Kuvassa 45 a on esitetty koekappaleen määrämittaan tasaamisessa käytetty muotti. Valmiin puristuskoekappaleen halkaisija oli 68 mm. Koekappaleen päättyypinnat tasattiin mahdollisimman tasaisiksi. Valmis puristuskoekappale suljettiin muovipussiin siten, ettei pussi puristanut kappaletta. Kuvassa 45 b on esitetty valmiita määrämittaan tasattuja koekappaleita.



Kuva 45: Turpeiden puristuslujuuden määrittäminen: a) puristuskoekappaleiden tasaamisessa käytetty 136 mm korkuinen muotti, b) valmiita puristuskoekappaleita, c) koekappale yksiakselisessa puristuskokeessa.

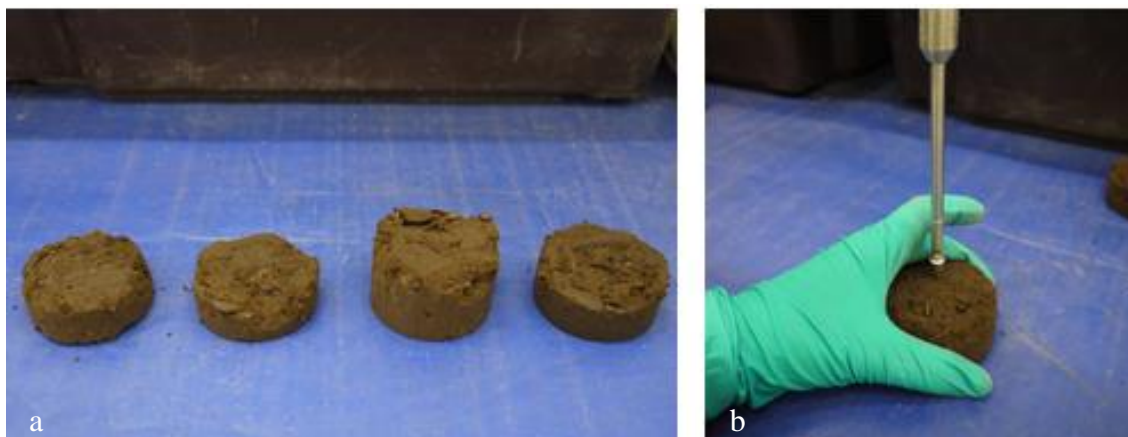
Puristuslujuus määritettiin yksiakselisella puristuskokeella (kuva 45 c) mukaillen standardia SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-7:fi. Turvekappaleiden puristusnopeutena käytettiin 2 mm / min. Koekappaleet kuormitettiin murtoon saakka, tai jos selkeää murtoa ei tapahtunut, 15 % muodonmuutokseen saakka.

4.3.5 Kimmomoduulin E_{50} määrittäminen

Kimmomoduuli E_{50} määritettiin turpeille samoin kuin savisille runkoaineille. Moduuli määritettiin puristusjännityksen, joka vastaa 50 % maksimipuristusjännityksestä, ja sitä vastaavan muodonmuutoksen suhteena. Muutamien turvekoekappaleiden kimmomoduuli määritettiin graafisesti jännitys-muodonmuutoskuvaajasta, koska raakadataa ei ollut mahdollista tulostaa laitevian vuoksi.

4.3.6 Penetrometrimääritys

Penetrometrimääritys tehtiin muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta samoin kuin savi- ja liejukappaleilla. Puristuslujuuden määrittystä varten koekappaleesta tasattiin 68 mm korkuinen puristuskoekappale. Muotoilun yhteydessä koekappaleen toisesta päästä otettiin koekappaleesta ylijäävä näytekiekko määrittäykseen. Näytekiekkoja on kuvassa 46 a.



Kuva 46: Turpeiden penetrometrimääritys: a) määrittäyksessä käytettyjä näytekiekkoja, b) stabiloidun turvekiekon penetrometrimääritys.

Määritys tehtiin näytekiekon sisemmästä päästä. Kiekkoa tuettiin sen reunoilta kädellä samalla, kun määrittystä tehtiin. Näin pyrittiin ehkäisemään kiekon hajoaminen reunoiltaan ja todellista tulosta heikommät tulokset. Kuten kuvasta 46 a havaitaan, kiekot olivat erikorkuisia. Joistakin paljon painuneista koekappaleista saatu näytekiekko oli ohut, jolloin kiekko hajosi helposti määrittäyksen yhteydessä. Tällaiset tulokset pyrittiin poistamaan lopullisista tuloksista.

4.3.7 Vesipitoisuuden ja tilavuuspainon määrittäminen

Vesipitoisuus määritettiin samoin kuin saven ja liejun testausohjelmassa (SFS 179-2 - CEN ISO/TS 17892-1:fi) Puristuslujuuden määrittäyksen jälkeen puristuskoekappale ja siitä mahdollisesti erottunut vesi siirrettiin astiaan, jonka massa tunnettiin. Astia ja pitkittäin halkaistu koekappale punnittiin, ja koekappaletta kuivattiin uunissa 105 °C lämpötilassa, kunnes koekappaleen massa ei enää muuttunut.

Turpeiden tilavuuspainot määritettiin kuten savelle ja liejulle (GLO-85). Määritys tehtiin puristuskoekappaleen tasaamisen yhteydessä. Valmiin puristuskoekappaleen tilavuus tunnettiin, ja valmis puristuskoekappale punnittiin ennen puristuslujuuden määrittäystä.

4.3.8 Vedenläpäisevyyden määrittäminen

Vedenläpäisevyys määritettiin Honkasuon turpeesta, ja määrittäminen tehtiin muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kuten saviin. Vedenläpäisevyyskoekappaleet valmistettiin

korkeampiin muotteihin kuin savikappaleet. Kuvassa 42 a on keskellä turpeelle käytetty vedenläpäisykoemuotti. Muottien halkaisija oli noin 100 mm, ja muotit verkotettiin toisesta päästä. Turvekoekappaleet esikuormitettiin kuten puristuskoekappaleet lukuun ottamatta ennen stabilointia tehtyä vedenläpäisevyyden määrittystä, jolloin koekappaletta ei esikuormitettu. Turpeen kokoonpuristumaan varauduttiin korkealla muotilla. Esi-kuormituspainojen massa laskettiin vastaamaan 18 kPa jännitystä. Sideaineena käytettiin 60 kg/m^3 Plussementtiä.

Esikuormitus aika oli 28 ja 90 vuorokautta. Lujittuneet koekappaleet muotoiltiin noin 100 mm korkuisiksi ja punnittiin. Myös kappaleiden tarkka halkaisija määritettiin. Koekappaleet kyllästettiin kyllästyspaineessa ja -gradientissa vedenläpäisyssä. Koekappaleiden kyllästettyä paineet ja gradientti säädettiin halutulle tasolle. Tehokkaana jännityksenä käytettiin 20 kPa. Gradienttia nostettiin kokeen aikana portaittain, kunnes koekappaleen läpi virtaavan veden määrä tasaantui.

4.4 Kiinteytetyn saven tutkimusohjelma

Kiinteytetyn saven tutkimusohjelmassa runkoaineena käytettiin samaa Koirapuiston savea kuin pohjanvahvistusta simuloivassa tutkimusohjelmassa. Sideaineena käytettiin Helsingin Hanasaaren lentotuhkaa (kivihiilen polton lentotuhka, voimalaitos B) kolmella eri määrällä. Käytetyt sideainereseptit on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13: Kiinteytetyn saven stabiloinnissa käytetyt sideainereseptit

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m^3]
Sa / Koirapuisto	LT	180
		230
		280

Tutkimusohjelmassa eri sideainemäärillä stabiloidusta savesta määritettiin vesipitoisuus, tilavuuspaino, puristus- ja penetrometrilujuus, muodonmuutosominaisuudet sekä juoksu- ja plastisuusraja. Lisäksi stabiloidusta savesta määritettiin suljettu leikkauslujuus häiriintymättömästä ja häiritystä näytteestä sekä sensitiivisyys kartiokokeella. Stabiloimattomasta runkoaineesta määritettiin suljettu leikkauslujuus häirityssä tilassa, ja tätä verrattiin häiriintymättömästä maakerroksesta siipikairalla määritettyyn redusoituun leikkauslujuuteen (luonnontilainen leikkauslujuus). Näin myös stabiloimattoman maan sensitiivisyyttä voitiin arvioida. Määritykset tehtiin luvussa 4.2 esitetyn mukaisesti.

5 LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET

5.1 Pohjanvahvistustutkimusohjelma

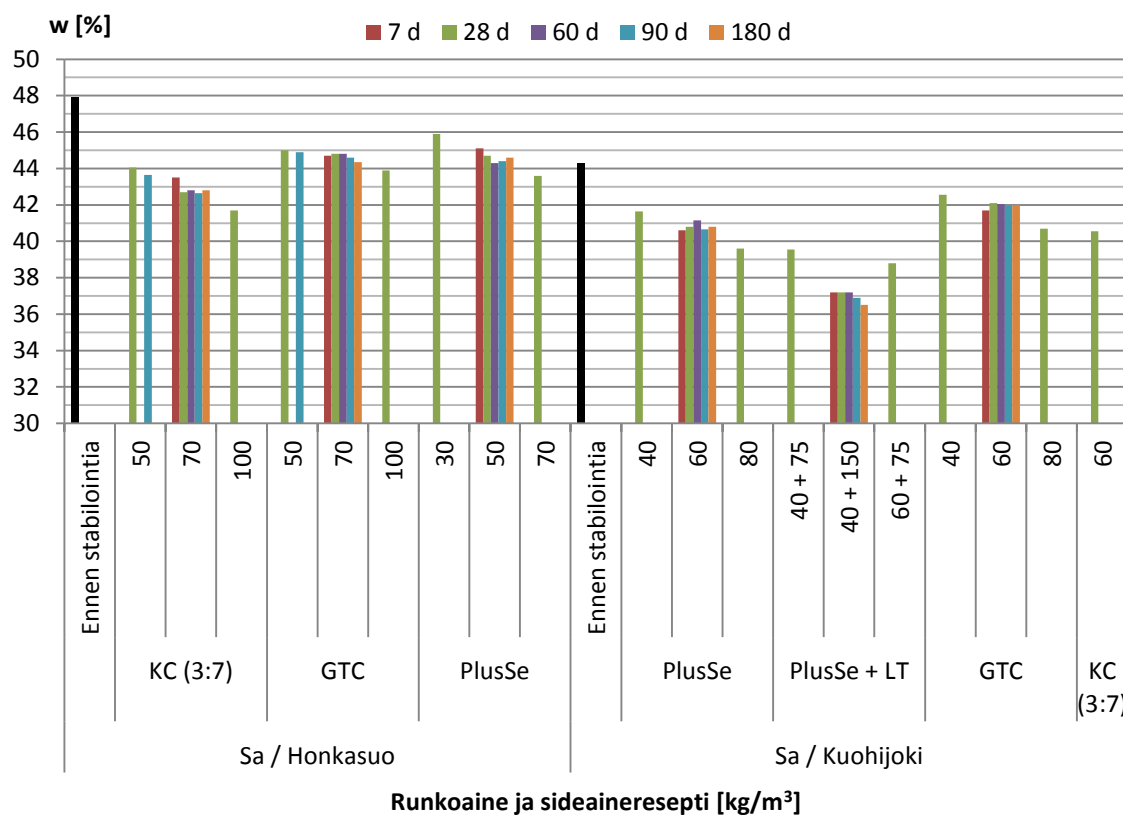
Tutkimusohjelmassa Honkasuon, Kuohijoen ja Koirapuiston savista sekä Koirapuiston liejusta määritettiin eri sideaineresepteillä tehdyn stabiloinnin ja eri lujittumisaikojen jälkeen vesipitoisuus, tilavuuspaino, konsistenssirajat (juoksu- ja plastisuusraja), yksiaksiaalinen puristuslujuus ja penetrometrillä saatava kärkevyyden kimmomoduuli sekä vedenläpäisevyyskerroin.

Honkasuon ja Hämeenlinnan turpeista määritettiin stabiloinnin jälkeen vesipitoisuus, tilavuuspaino, yksiaksiaalinen puristuslujuus ja kärkevyyden kimmomoduuli, vedenläpäisevyyskerroin sekä esikuormituksen aikainen painuma. Tutkimusohjelman tulokset on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 1.

5.1.1 Vesipitoisuus ja tilavuuspaino

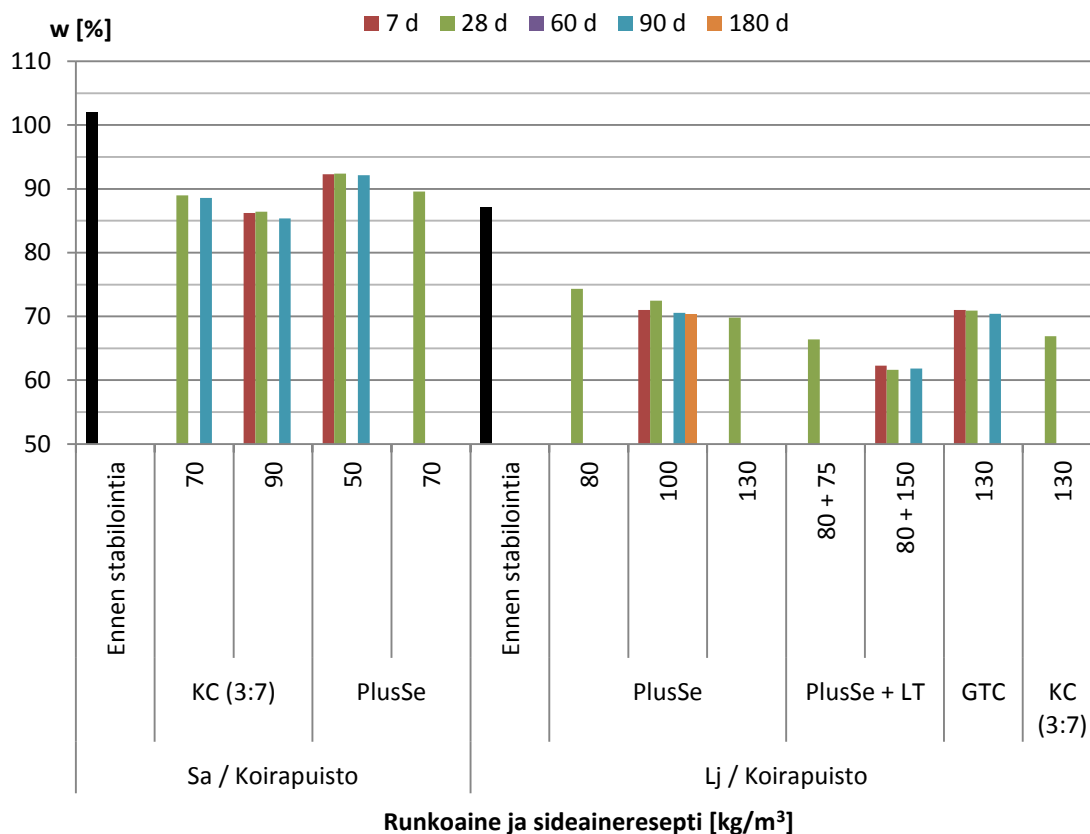
Vesipitoisuus

Honkasuon ja Kuohijoen savien vesipitoisuusmääritysten tulokset on esitetty kuvassa 47. Eri-ikäisinä koestettujen koekappaleiden tulokset on esitetty kaaviossa sideaineresepteittäin. Rinnakkaiskoekappaleiden vesipitoisuudet on esitetty kaaviossa tulosten keskiarvona. Mustat pylväät kuvaavat alkuperäistä vesipitoisuutta ennen stabilointia.



Kuva 47: Honkasuon ja Kuohijoen savien vesipitoisuudet ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Kuvassa 48 on esitetty Koirapuiston saven ja liejun vesipitoisuusmäärittysten tulokset.



Kuva 48: Koirapuiston saven ja liejun vesipitoisuudet ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Kuvista havaitaan, että stabiloidun maan vesipitoisuus on pienempi kuin runkoaineen vesipitoisuus. Havainto pätee kaikkiin kaavioissa esitettyihin runkoaineisiin, kaikkiin sideaineresepteihin sekä lujittumisaikoihin. Kaavioista nähdään, että samaa sideainetta ja runkoainetta käytettäessä sideaineen määrä vaikuttaa saavutettavaan vesipitoisuuteen. Suuri sideainemäärä siis pienentää vesipitoisuutta enemmän kuin pieni sideainemäärä. Erot ovat kuitenkin melko pieniä. Etenkin jos ero sideainemäärässä on vain noin 20 kg/m^3 , on ero vesipitoisuudessa melko vähäinen.

Samalla sideainereseptillä (sekä käytetty sideaine että sideainemäärä ovat samat) stabiloitujen eri-ikäisten koekappaleiden vesipitoisuuksissa on hyvin pieniä eroja. Tietyillä sideaineresepteillä stabiloitujen näytteiden kohdalla vesipitoisuus vaikuttaisi pienenevän hieman lujittumisajan edetessä. Toisaalta myös päinvastaisia trendejä on havaittavissa tuloksissa. Erot ovat kuitenkin niin marginaalisia, että ne voivat selittyä satunnaisella vaihtelulla. Tulosten perusteella voidaan todeta, että suurimmat muutokset vesipitoisuudessa tapahtuvat ensimmäisten 7 vuorokauden kuluessa stabiloinnista. Tämän jälkeen muutokset ovat hyvin pieniä.

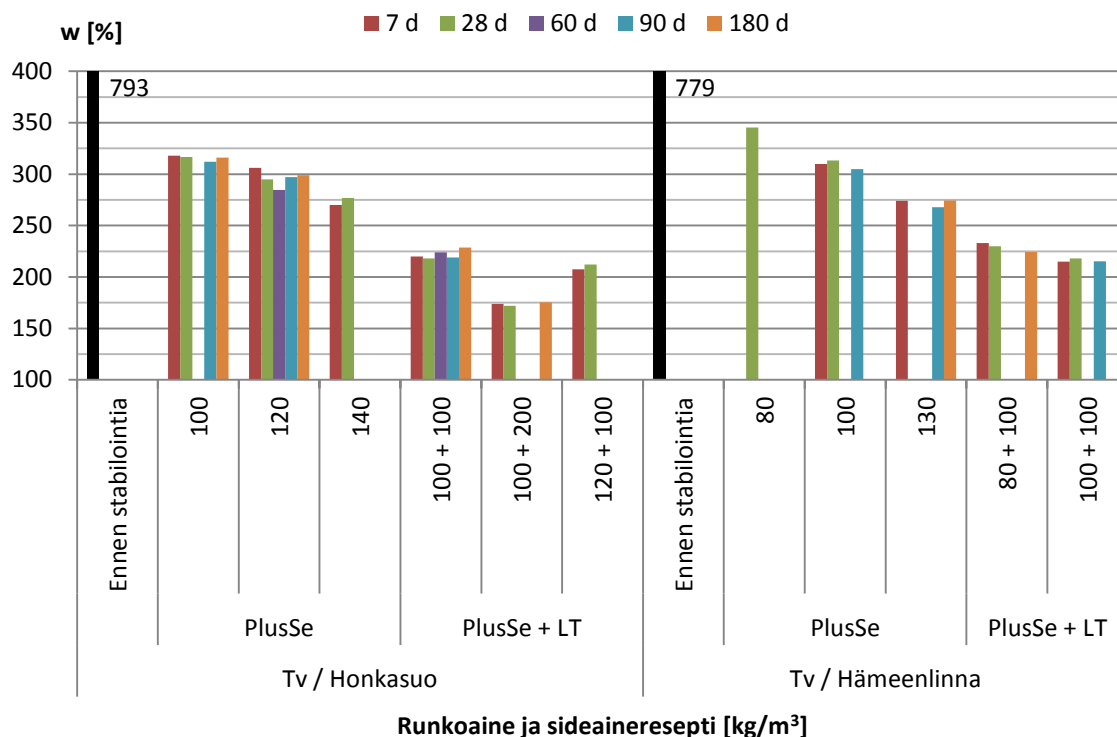
Honkasuon savella kalkkisementti pienensi vesipitoisuutta enemmän kuin Plussementti ja GTC, kun vertaillaan samoja sideainemääriä. Kuohijoen saven vesipitoisuus pieneni suunnilleen saman verran Plussementillä ja kalkki-sementtiseoksella stabiloitaessa. Sta-

bilointi GTC:llä pienensi vesipitoisuutta näitä sideaineita vähemmän. Vesipitoisuus pieneni eniten Plussementin ja lentotuhkan seosta käytettäessä, mutta suora vertailu muihin sideaineisiin ei ole mahdollista, koska sideainemäärä on merkittävästi suurempi kuin muilla sideaineresepteillä. Tulos on kuitenkin looginen, sillä oletettavissa oli, että suuri sideainemäärä pienentää vesipitoisuutta paljon.

Plussementin ja lentotuhkan seoksella stabiloidun saven vesipitoisuuksista nähdään, että pelkkä lentotuhka laskee merkittävästi vesipitoisuutta, kun tuhkaa on paljon. Kun vertaillaan Kuohijoen savea, johon on lisätty 40 kg/m^3 Plussementtiä sekä savea, johon on lisätty saman verran sementtiä, mutta 75 kg/m^3 lentotuhkaa, havaitaan että vesipitoisuus pienenee selvästi enemmän sementin ja lentotuhkan seoksella kuin pelkällä sementillä. Lentotuhkan määrä oli kuitenkin varsin suuri, joten tulos on odotettu. Toisaalta myös sementin määrä vaikuttaa saavutettavaan vesipitoisuuteen. Tämä havaitaan, kun vertaillaan savea, johon on lisätty 40 kg/m^3 Plussementtiä ja 75 kg/m^3 lentotuhkaa sekä savea, johon on lisätty saman verran lentotuhkaa, mutta 60 kg/m^3 Plussementtiä. Enemmän sementtiä sisältäneen saven vesipitoisuus on pienempi kuin vähemmän sementtiä sisältäneen seoksen.

Koirapuiston runkoaineiden vesipitoisuusmääritysten tulokset ovat samansuuntaisia kuin Honkasuon ja Kuohijoen savilla. Koirapuiston runkoaineiden alkuperäinen vesipitoisuus oli suurempi kuin muiden savisten runkoaineiden. Kalkki-sementti -seos laski vesipitoisuutta enemmän kuin pelkkä Plussementti. Koirapuiston liejulla GTC:llä saavutettiin samansuuruisia muutoksia vesipitoisuudessa kuin Plussementillä. Plussementin ja lentotuhkan seos vaikutti jälleen eniten vesipitoisuuteen, joskin myös käytetty sideainemäärä oli selvästi suurin.

Stabiloitujen turpeiden vesipitoisuusmääritysten tulokset on esitetty kuvassa 49. Kaaviossa on esitetty vertailuna myös runkoaineiden alkuperäiset vesipitoisuudet, joskin asteikko on katkaistu jo 400 % kohdalta tulkittavuuden parantamiseksi.



Kuva 49: Honkasuon ja Hämeenlinnan turpeiden vesipitoisuudet ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Tuloksista havaitaan, että turpeiden vesipitoisuudet pienenevät merkittävästi stabiloinnin jälkeen. Vesipitoisuus pieneni kaikilla sideaineresepteillä huomattavasti enemmän kuin savisilla runkoaineilla. Toisaalta käytetyt sideainemäärät olivat suuria verrattuna savisten runkoaineiden sideainemääriin, vaikkakin ne olivat varsin tyypillisiä turpeiden pohjanvahvistuksessa käytettäviä määriä.

Suurin muutos saavutettiin jälleen Plussementin ja lentotuhkan seoksella, kun kokonais-sideainemäärä oli suuri. Kuvasta 49 nähdään samanlaiset trendit vesipitoisuuksissa kuin savisilla koekappaleilla: suuri sideainemäärä pienentää vesipitoisuutta paljon ja suurin muutos tapahtuu ensimmäisen viikon aikana.

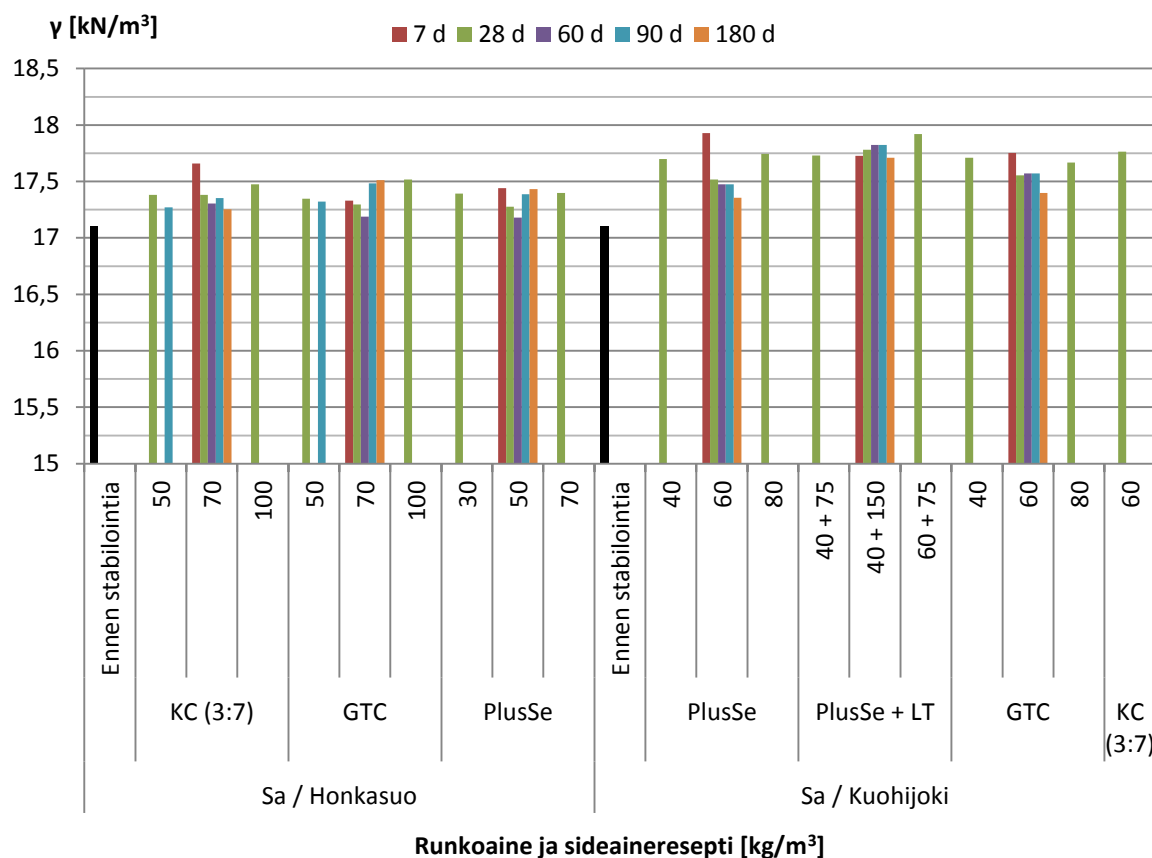
Vesipitoisuuksia verrattiin myös sideaineen aiheuttaman kuiva-ainespitoisuuden kasvun vaikutukseen. Sideaine pienentää vesipitoisuutta, koska maan kuiva-ainespitoisuus kasvaa kuivan sideaineen vuoksi. Lisäksi maan ja sideaineen väliset reaktiot kuluttavat vettä. Kun kuiva-aineksen lisääntymisen aiheuttamaa vesipitoisuuden laskennallista muutosta verrattiin saatuihin vesipitoisuustuloksiin, havaittiin, että savisilla runkoaineilla suurin osa vesipitoisuuden muutoksesta aiheutui kuiva-aineksen lisääntymisestä. Tällä tavalla määritettynä reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli vain noin 0,5 - 6 % savilla ja noin 5 - 11 % liejulla.

Reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli pienin käytettäessä GTC:tä sideaineena. Tällöin reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli laskennallisesti sideainemäärästä riippuen savil-

la noin 0,5 - 2 % ja liejulla noin 5 %. Kalkkisementillä stabiloiduissa koekappaleissa reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli suurin, mutta ero Plussementtiin oli melko pieni. Kalkkisementillä ja Plussementillä stabiloitujen savien reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli noin 2 - 6 % ja liejulla noin 6 - 11 %. Lentotuhkan ja Plussementin seosta käytettäessä reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli noin 3 % savilla ja noin 9 % liejulla. Turpeilla vastaava tulos oli kaikilla sideaineresepteillä noin 30 %, mutta tulos ei ole yhtä luotettava kuin savisilla runkoaineilla, sillä turpeiden säilytys lujittumisen aikana on erilainen. Turvekoekappaleista pääsee suotautumaan vettä esikuormituksen aikana. Lisäksi turvekappaleiden yläpäästä haihtuu vettä, vaikkakin koekappaleiden alapää on kosketuksissa veden kanssa.

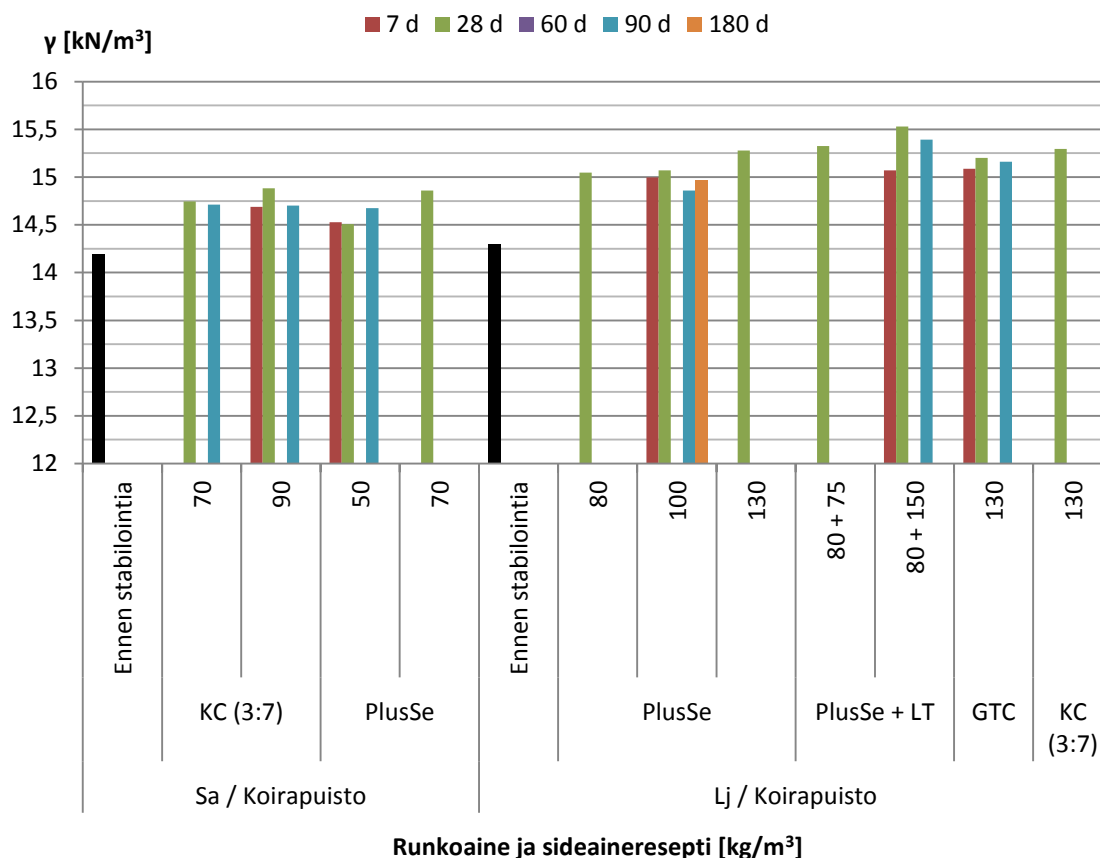
Tilavuuspaino

Honkasuon ja Kuohijoen savien tilavuuspainomääritysten tulokset on esitetty kuvassa 50. Rinnakkaiskoekappaleiden tilavuuspainot on esitetty kaaviossa tulosten keskiarvona.



Kuva 50: Honkasuon ja Kuohijoen savien tilavuuspainot ennen ja jälkeen stabiloinnin.

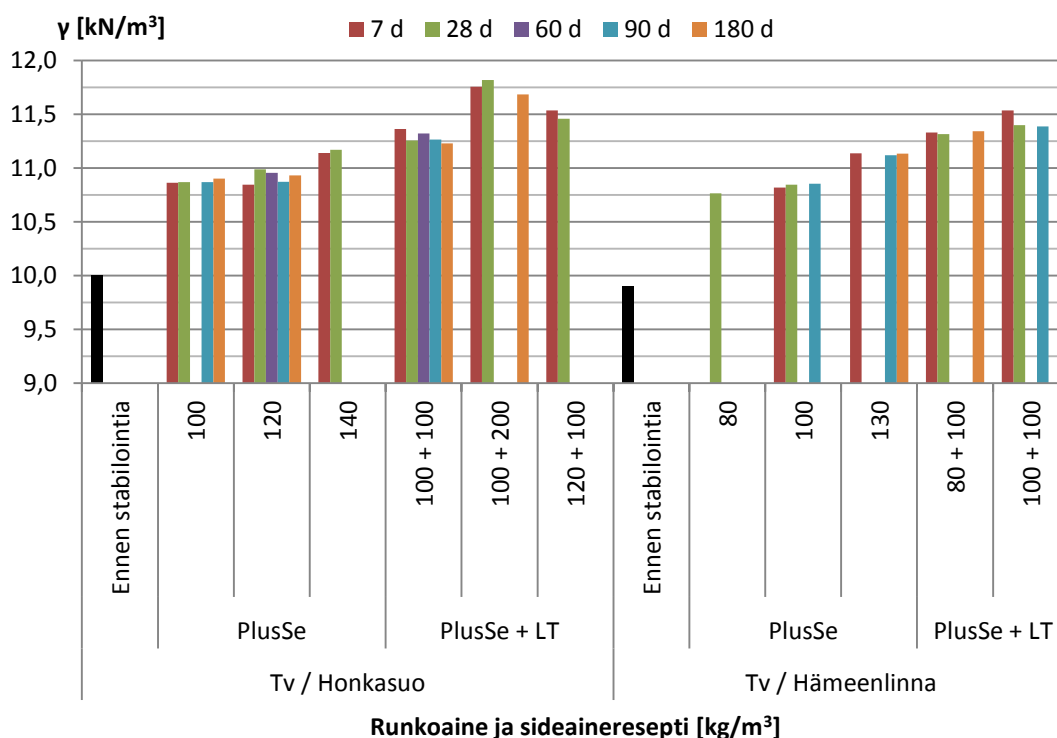
Koirapuiston runkoaineiden tilavuuspainot on esitetty kuvassa 51.



Kuva 51: Koirapuiston saven ja liejun tilavuuspainot ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Kuvista nähdään, että tilavuuspainot kasvoivat stabiloinnin jälkeen. Kasvu oli prosentuaalisesti melko vaatimatonta, mutta melko selvästi kaikissa runko- ja sideaineyhdistelmissä havaittavissa. Jos vertaillaan samalla sideainemäärällä, mutta eri sideaineella stabiloituja runkoaineita, ei tilavuuspainoissa havaita merkittäviä eroja. Sideainetyyppi ei siis vaikuttanut merkittävästi tuloksiin. Myös sideainemäärän vaikutus näyttäisi olevan melko pieni. Vain hyvin suuret sideainemäärät (sementin ja lentotuhkan seokset) kasvattavat tilavuuspainoa selvästi muita tuloksia enemmän. Eri-ikäisten koekappaleiden välillä ei vaikuta olevan suuria eroja, ja muutokset tapahtuvat pääasiassa ensimmäisen viikon kuluessa stabiloinnista.

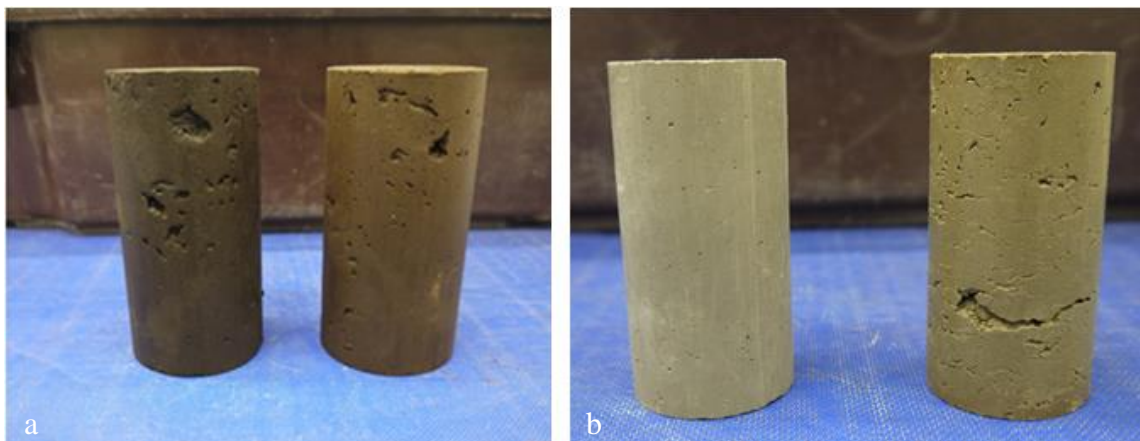
Turpeen tilavuuspainomäärittysten tulokset on esitetty kuvassa 52.



Kuva 52: Honkasuon ja Hämeenlinnan turpeiden tilavuuspainot ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Turpeiden tilavuuspainot kasvoivat prosentuaalisesti enemmän kuin savisten runkoaineiden tilavuuspainot. Tulos on looginen, koska turpeiden stabiloinnissa käytettiin enemmän sideainetta kuin savisten runkoaineiden stabiloinnissa. Tällöin kiintoaineksen määrä kasvaa jo sideaineen kiintoaineksesta. Lisäksi suuri sideainemäärä pienentää vesipitoisuutta enemmän kuin pieni sideainemäärä, jolloin kiintoaineksen suhteellinen osuus kasvaa.

Tilavuuspainoja arvioitaessa on huomioitava, että stabiloidut massat käyttäytyivät eri tavoin sullottaessa. Sullontatyön onnistuminen vaikutti siis saavutettavaan tiheyteen ja siten saavutettavaan tilavuuspainoon. Rinnakkaiskappaleiden välillä eroa oli yleisesti vain vähän, mutta eri sideaineiden ja runkoaineiden välillä esiintyi eroja. Eroja sullottavuudessa esiintyi sekä runkoaineittain että sideaineittain. Esimerkiksi Koirapuiston lieju oli niin jäykkää, että se piti sulloa koekappaleputkeen puutangolla vastakappaleen sijaan. Tästä huolimatta liejukoekappaleisiin jäi enemmän ilmaa kuin muihin koekappaleisiin. Osa stabiloiduista massoista käyttäytyi tahmeammin ja vaikeammin sullottavasti kuin toiset massat. Turvekoekappaleilla tahmeus ilmeni siten, että sullontanuijaan tarttui helposti jo sullottua massaa, jolloin massa löyhtyi. Sullonnalla tavoiteltiin kuitenkin lähinnä ilmataskujen poistamista, ei varsinaista tiivistymistä. Kuvassa 53 on esitetty eritavalla sullonnassa tiivistyneitä puristuskoekappaleita, joista määritettiin myös tilavuuspaino.



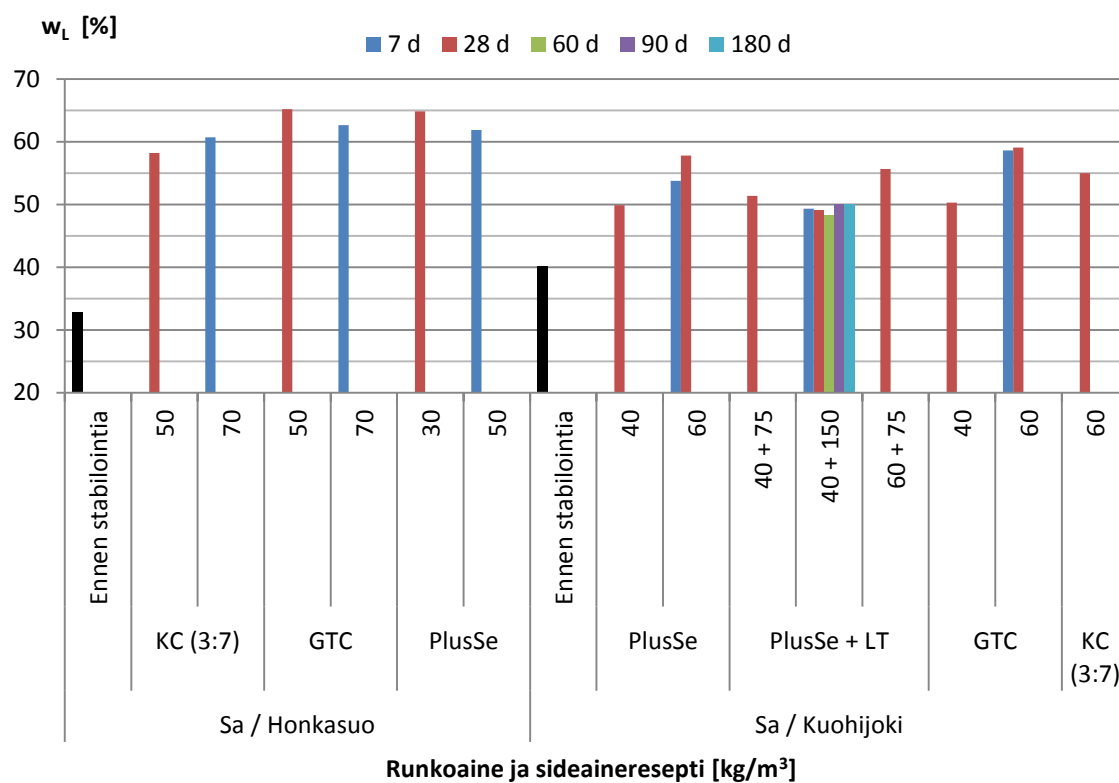
Kuva 53: Eroja koekappaleiden sullontatyön onnistumisessa: a) kaksi erilaista turvekoekappaletta, b) savikoekappale ja liejukoekappale.

Kuvasta havaitaan, että tilavuuspainon määrittämisessä käytettyjen koekappaleiden tiheyden välillä oli eroja. Turvekoekappaleissa (kuva 53 a) esiintyi satunnaisesti melko suuriakin ilmataskuja. Kuvasta 53 b nähdään hyvin liejukoekappaleeseen jääneitä ilmataskuja. Viereisessä savikappaleessa (Honkasuon savi) oli sen sijaan vain vähän ilmahuokosia sekä näkyvällä pinnalla että koekappaleen sisällä.

Tuloksissa esiintyy jonkin verran epätarkkuutta myös mittausmenetelmän vuoksi. Tilavuuspainot määritettiin puristuskoekappaleista, jotka oli tasattu määrämittäisiksi. Joissakin tapauksissa koekappale jäi hieman tavoiteltua lyhyemmäksi, kun koekappaleen päitä jouduttiin tasaamaan tavallista enemmän luotettavan puristuslujuustuloksen saamiseksi. Lisäksi osa pitkään lujittuneista savikoekappaleista oli kutistunut hieman koekappaleputkessa. Tällöin kappaleen halkaisija ei vastannut täysin putken sisähalkaisijaa. Edellä mainittujen seikkojen aiheuttamaa epätarkkuutta voidaan kuitenkin pitää hyvin pienenä verrattuna esimerkiksi sullontatyön aiheuttamaan epätarkkuuteen.

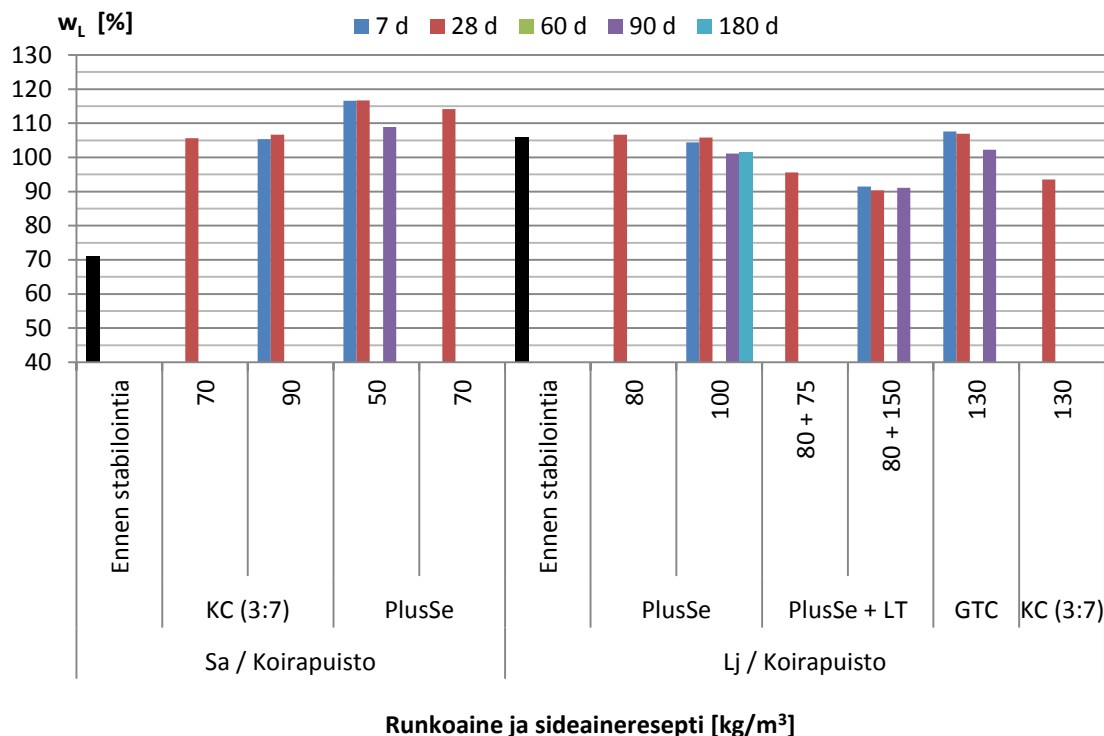
5.1.2 Konsistenssirajat

Kuvassa 54 on esitetty Honkasuon ja Kuohijoen eri sideaineresepteillä stabiloitujen savien juoksurajat.



Kuva 54: Honkasuon ja Kuohijoen savien juoksurajat stabiloinnin jälkeen sekä runkoaineiden alkuperäiset juoksurajat.

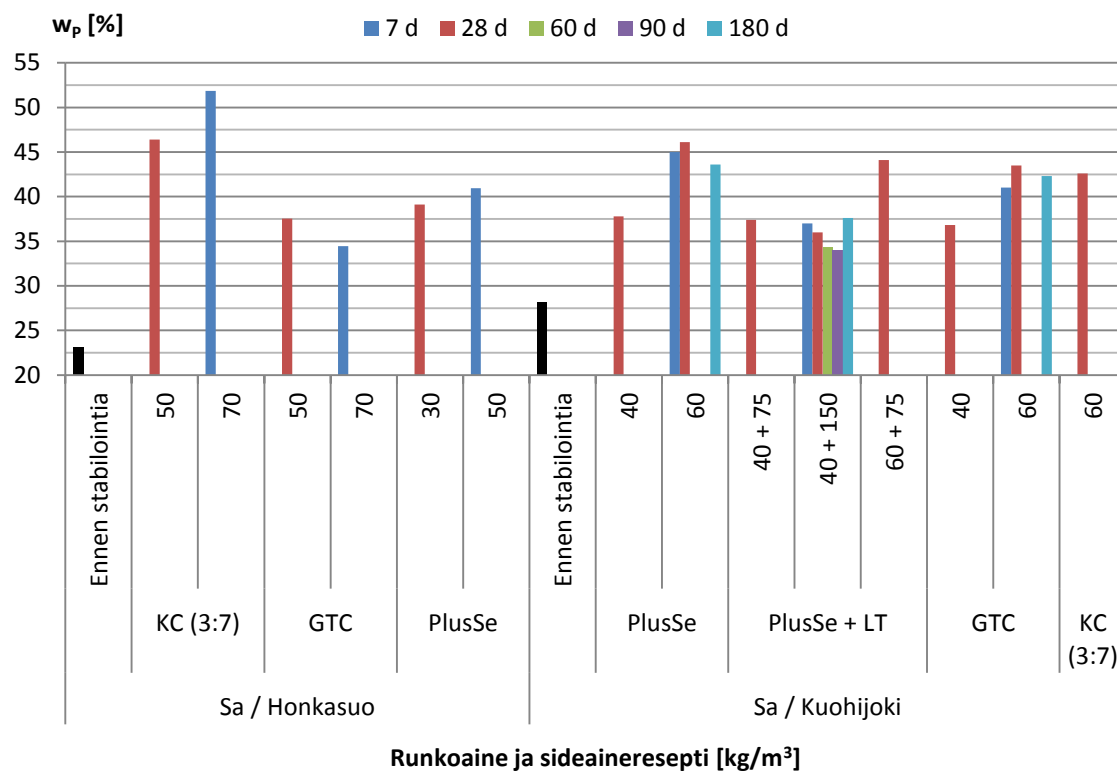
Kuvassa 55 on esitetty Koirapuiston runkoaineiden juoksurajat ennen ja jälkeen stabiloinnin.



Kuva 55: Koirapuiston saven ja liejun juoksurajat stabiloinnin jälkeen sekä runkoaineiden alkuperäiset juoksurajat.

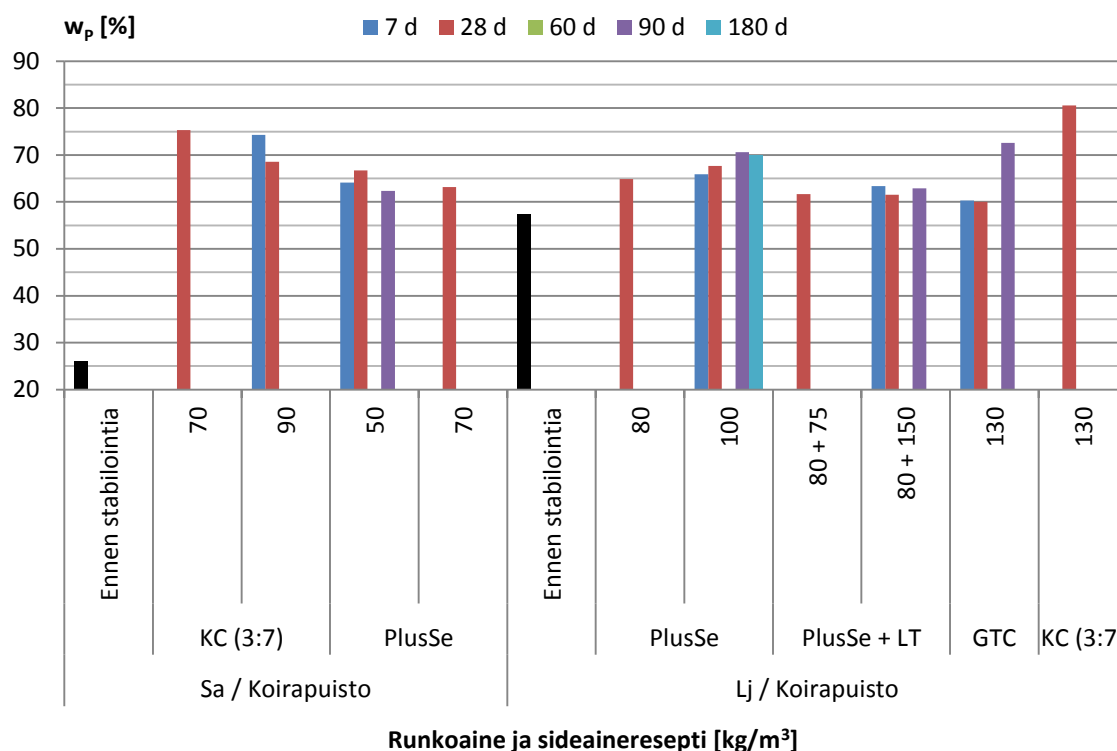
Tuloksista havaitaan, että kaikkien koekappaleiden juoksurajat lukuun ottamatta Koirapuiston liejua kasvoivat alkuperäiseen verrattuna. Koirapuiston liejun juoksurajat pysyivät lähes ennallaan stabiloinnin jälkeen, tai ne pienenevät hieman. Honkasuon ja Koirapuiston savien juoksurajat kasvoivat prosentuaalisesti eniten. Eri sideaineiden välillä ei ole havaittavissa merkittäviä eroja, kun huomioidaan juoksurajan määrittämiseen liittyvä epävarmuus. Lentotuhkaa sisältävät sideainereseptit muuttivat juoksurajaa vähiten Kuohijoen savella. Sen sijaan Koirapuiston liejun juoksuraja muuttui eniten lentotuhkaa ja sementtiä käytettäessä. Kuohijoen saven juoksuraja kasvoi silti alkuperäisestä, kun taas Koirapuiston liejun juoksuraja pieneni. Sideainemäärä näyttäisi vaikuttavan melko vähän, kun kaikki käytetyt sideainemäärät ovat sellaisia, että niillä on saavutettu pohjavahvistukseen soveltuvia eli melko suuria lujuuksia. Lentotuhkaa sisältävissä sideaineseoksissa voidaan havaita suurin muutos juoksurajassa silloin, kuin lentotuhkan osuus on suuri.

Kuvassa 56 on esitetty Honkasuon ja Kuohijoen savien plastisuusrajat ennen ja jälkeen stabiloinnin.



Kuva 56: Honkasuon ja Kuohijoen savien plastisuusrajat stabiloinnin jälkeen sekä runkoaineiden alkuperäiset plastisuusrajat.

Kuvassa 57 on esitetty Koirapuiston koekappaleiden plastisuusrajat.

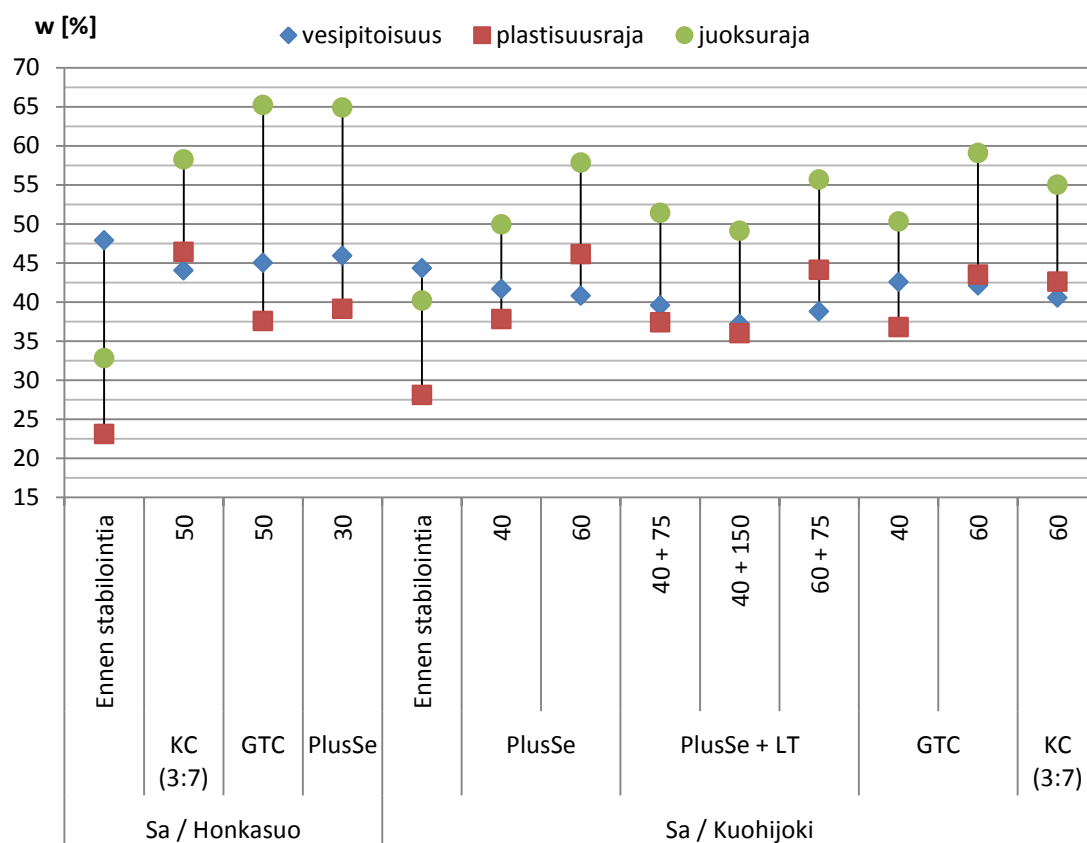


Kuva 57: Koirapuiston saven ja liejun plastisuusrajat stabiloinnin jälkeen sekä runkoaineiden alkuperäiset plastisuusrajat.

Kaavioista nähdään, että kaikkien koekappaleiden plastisuusrajat kasvoivat stabiloinnin jälkeen. Muutokset olivat jälleen suurimmat Honkasuon ja Koirapuiston savilla. Koirapuiston liejulla plastisuusraja kasvoi vähän verrattuna muihin runkoaineisiin. Lentotuhkan ja sementin seos kasvatti vain vähän Kuohijoen saven plastisuusrajaa muihin sideaineisiin verrattuna. Sideainekohtaiset erot olivat melko suuria Honkasuon ja Kuohijoen savilla, mutta Koirapuiston runkoaineilla ei havaittu suuria eroja eri sideaineiden välillä.

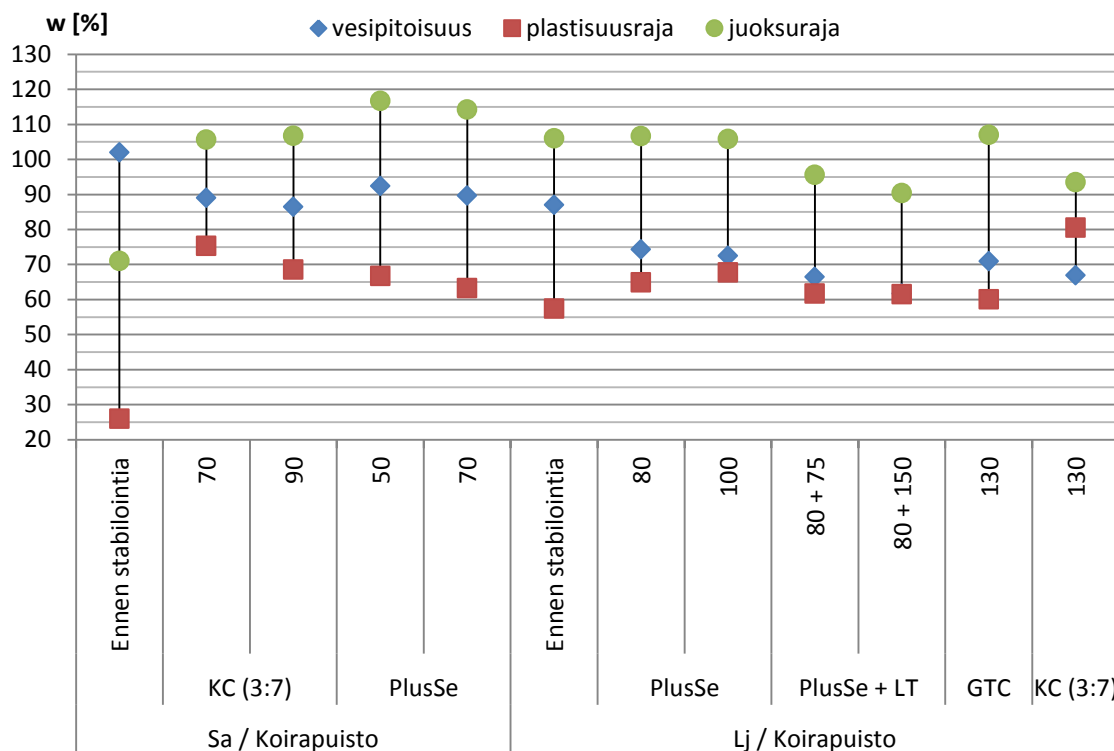
Kuvissa 58 ja 59 on havainnollistettu runkoaineittain stabiloinnin aiheuttamia muutoksia runkoaineiden konsistenssissa. Samassa kaaviossa on esitetty stabiloinnin aiheuttamat muutokset maan vesipitoisuudessa, juoksurajassa ja plastisuusrajassa. Kaikissa kaavioissa tarkastelu on tehty sekä stabiloimattomasta maasta että 28 vuorokauden kuluttua stabiloinnista. Kuvista nähdään konsistenssirajojen lisäksi plastisuusluku juoksu- ja plastisuusrajojen erotuksena.

Kuvassa 58 on esitetty Honkasuon ja Kuohijoen savien vesipitoisuudet sekä juoksu- ja plastisuusrajat.



Kuva 58: Honkasuon ja Kuohijoen savien vesipitoisuudet sekä juoksu- ja plastisuusrajat ennen stabilointia ja 28 vuorokauden iässä.

Kuvassa 59 on esitetty Koirapuiston saven ja liejun vesipitoisuudet sekä juoksu- ja plastisuusrajat.



Kuva 59: Koirapuiston saven ja liejun vesipitoisuudet sekä juoksu- ja plastisuusrajat ennen stabilointia ja 28 vuorokauden iässä.

Kuvasta nähdään, että samanaikaisesti vesipitoisuuden pienenemisen kanssa Honkasuon saven juoksu- ja plastisuusraja kasvoivat. Havaitaan, että runkoaineen vesipitoisuus oli selvästi juoksurajan yläpuolella ennen stabilointia. Savi oli juoksevassa tilassa. Kuu- kauden iässä juoksuraja oli selvästi yli maan vesipitoisuuden, ja myös alkuperäistä vesi- pitoisuutta suurempi. Plastisuusraja kasvoi lähelle vallitsevaa vesipitoisuutta. Havainnot pätevät kaikkiin sideaineresepteihin, joskin niiden välillä on jonkin verran vaihtelua.

Kuohijoen saven konsistenssi muuttui stabiloinnin myötä samoin kuin Honkasuon saven konsistenssi. Stabiloimattoman runkoaineen vesipitoisuus oli alun perin melko lähellä juoksurajaa. Runkoaine oli juoksevassa konsistenssissa. Stabiloinnin jälkeen vesipitoi- suus pieneni samanaikaisesti juoksu- ja plastisuusrajan kasvun kanssa. Stabiloinnin jäl- keen maa oli sideainereseptistä riippuen plastisessa tai kiinteässä konsistenssissa.

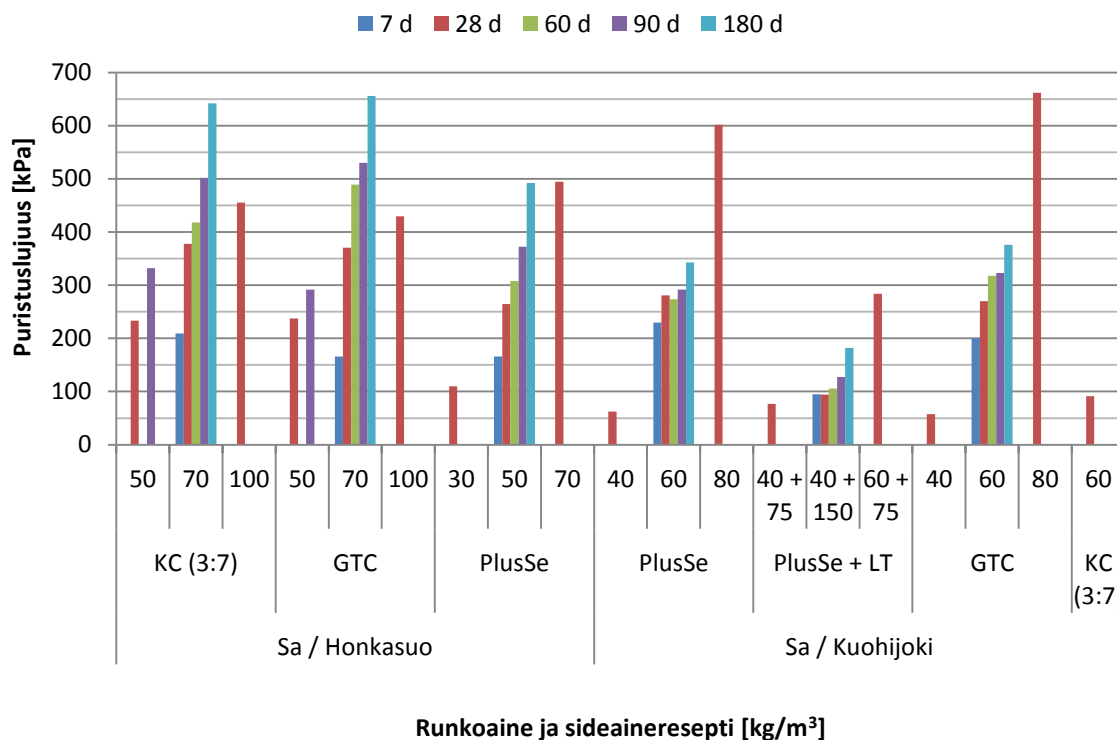
Koirapuiston savi käyttäytyi samoin kuin Honkasuon ja Kuohijoen savet, joskin Koira- puiston savi jäi stabiloinnin jälkeen selvimmin plastiseen konsistenssiin. Vesipitoisuu- det pienenivät ja juoksu- ja plastisuusraja kasvoivat. Lieju käyttäytyi selvästi poik- keavasti muihin runkoaineisiin verrattuna. Maan vesipitoisuus pieneni, ja plastisuusraja kasvoi, mutta juoksuraja joko kasvoi hieman tai laski selvästi, sideainereseptistä riippu- en. Kuvasta 59 havaitaan, että liejun juoksuraja pieneni sementin ja lentotuhkan seosta sekä kalkkisementtiä käytettäessä. Lieju oli ennen sideaineen lisäystä plastisessa konsis- tenssissa, ja stabiloinnin jälkeen se oli plastisessa tai kiinteässä konsistenssissa.

Stabiloinnin jälkeen määritettyihin juoksu- ja plastisuusrajoihin sisältyy jonkin verran epätarkkuutta käytettyjen mittausmenetelmien vuoksi. Määritykset tehtiin vain koekappaleille, joiden puristuslujuus oli keskimäärin noin 100 kPa tai alle, joissakin tapauksissa 200 kPa tai alle. Lujimmista koekappaleista ei voitu tehdä määrityksiä, sillä stabiloidun massan hajottaminen tasaiseksi massaksi ei ollut mahdollista. Vaikka määritykset tehtiin vain pehmeimmille kappaleille, sisältyi määrityksiin epävarmuutta. Esimerkiksi plastisuusrajan määrittämisessä kieritettävä rihma muuttui muotoiltavasta murusiksi hyvin äkkiä, eikä tarkka määrittäminen ollut aina mahdollista. Samoin koputuskokeissa esiintyi stabiloimattomia materiaaleja enemmän hajontaa rinnakkaismääritysten välillä. Epävarmuutta pyrittiin vähentämään useilla rinnakkaismäärittäyksillä, ja tulokset laskettiin laskettu näiden keskiarvoista.

Kaikkiin pohjanvahvistusohjelman stabiloituihin materiaaleihin jouduttiin lisäämään vettä konsistenssirajojen määrittämiseksi. Koekappaleiden vesipitoisuus oli ennen lisäystä plastisen tai kiinteän olomuodon vesipitoisuudessa. Lisäksi tulee muistaa, että stabiloimalla lujitettu maa (pohjanvahvistus) ei koskaan esiinny maastossa yhtä häiriytystä tilassa kuin laboratorio-olosuhteissa.

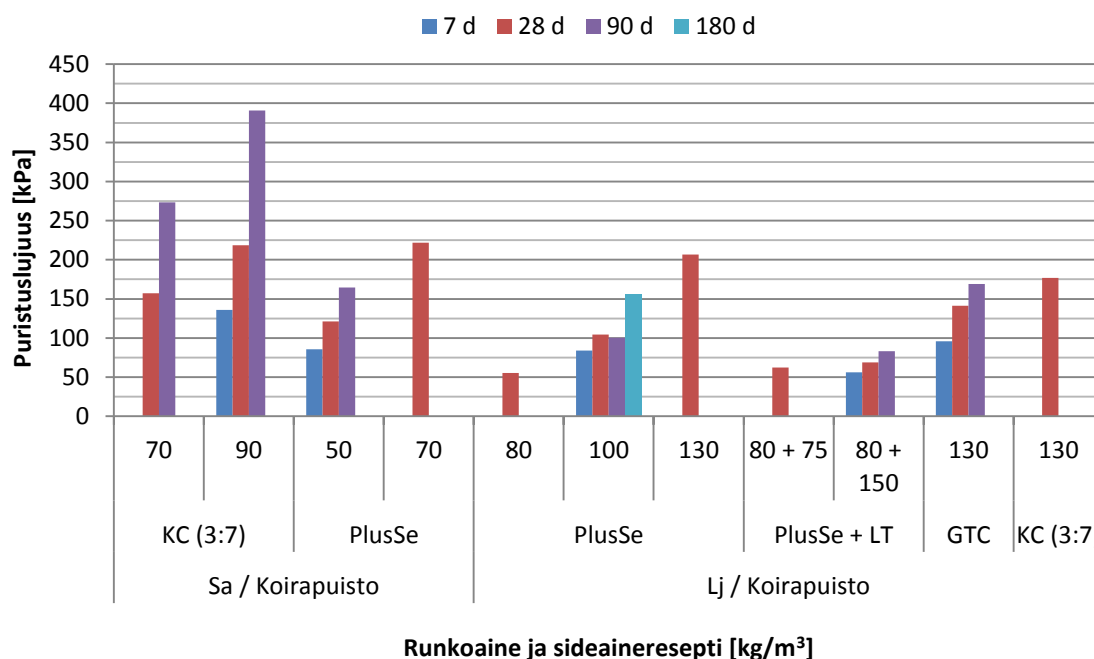
5.1.3 Yksiaksiaalinen puristuslujuus

Kuvassa 60 on esitetty Honkasuon ja Kuohijoen savien yksiaksiaalisten puristuskokeiden tulokset. Rinnakkaiskoekappaleiden puristuslujuudet on esitetty kaaviossa tulosten keskiarvona.



Kuva 60: Honkasuon ja Kuohijoen savien puristuslujuustulokset.

Kuvassa 61 on esitetty Koirapuiston runkoaineiden puristuslujuustulokset.



Kuva 61: Koirapuiston saven ja liejun puristuslujuustulokset.

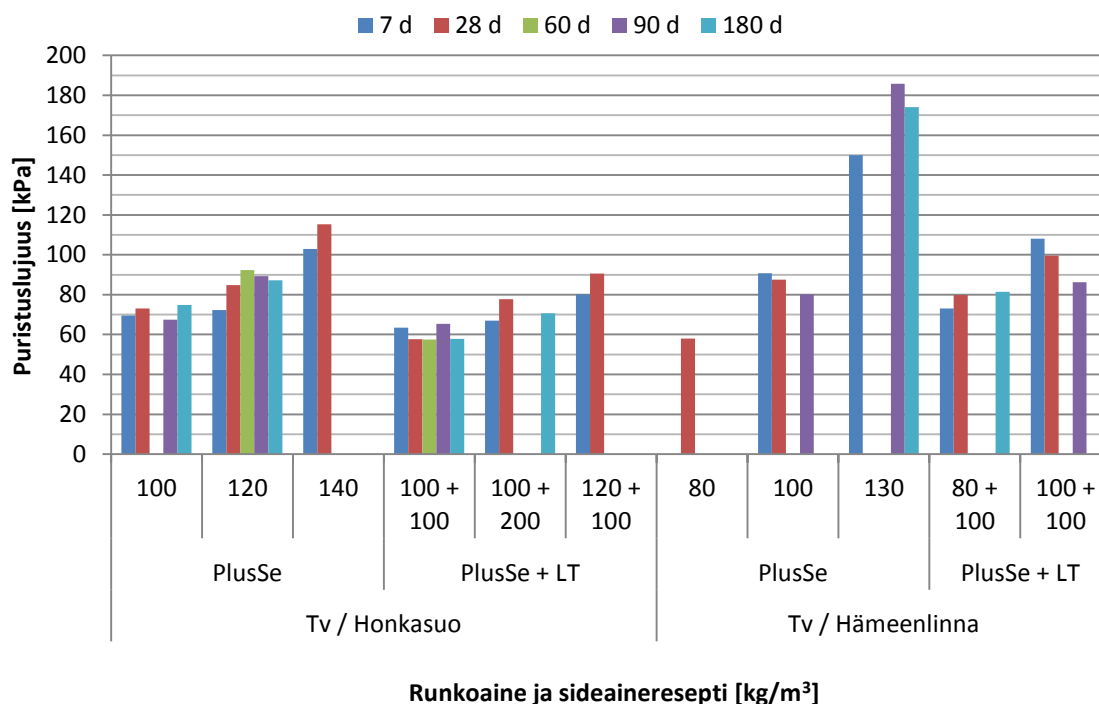
Kuvasta 60 havaitaan, että Honkasuon savi lujittui parhaiten Plussementillä. Ero kalkkimentillä ja GTC:llä saavutettaviin lujuuksiin oli melko vähäinen. Kalkkimentillä ja GTC:llä stabiloidun saven puristuslujuudet olivat hyvin samansuuruisia. Kuohijoen savi lujittui lähes yhtä hyvin Plussementillä ja GTC:llä. Stabilointi sementin ja lentotuhkan seoksella kasvatti vain hyvin vähän saavutettavaa lujuutta, kun vertaillaan pelkällä sementillä ja sementin ja lentotuhkan seoksella stabiloitua maata. Kuohijoen saven puristuslujuudet moninkertaistuvat sideainemäärän kaksinkertaistuessa. Muidenkin runkoaineiden puristuslujuudet kasvoivat selvästi, kun sideainemäärää lisättiin, mutta muutos ei ollut yhtä suuri.

Kuvasta 61 nähdään, että Koirapuiston lieju lujittui savisista runkoaineista selvästi heikoimmin. Plussementillä saavutettiin suurimmat lujuudet, joskin erot kalkkimenttiin ja GTC:n olivat varsin pieniä. Lentotuhka ei lisännyt lujuutta mainittavasti. Koirapuiston savi lujittui huomattavasti paremmin kuin lieju. Liejun puristus- ja muodonmuutosominaisuuksia arvioitaessa tulee huomioida liejukoekappaleiden huokoisuus (kuva 37). Ilmataskuja sisältävä koekappale käyttäytyy puristuksessa eritavoin kuin sellainen koekappale, josta ilmahuokoset on saatu poistettua. Puristuksen aikana syntyvä muodonmuutos on tällöin suuri ja lujuus pieni.

Kuvasta havaitaan, että savisten koekappaleiden lujuuskehitys 7 ja 180 vuorokauden välillä oli merkittävää. Toisin kuin muissa stabiloinnin jälkeen määritetyissä ominaisuuksissa, havaitaan puristuslujuuksissa merkittävää kasvua koekappaleiden iän lisää-

tyessä. Lujuus 180 vuorokauden iässä oli joissakin tapauksissa jopa yli kolminkertainen 7 vuorokauden lujuuteen verrattuna.

Turpeen yksiaksiaalisten puristuskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 62. Rinnakkaiskoekappaleiden puristuslujuudet on esitetty kaaviossa tulosten keskiarvona.



Kuva 62: Turpeen puristuslujuus eri sideaineresepteillä ja eri-ikäisenä.

Turpeiden puristuslujuudet jäivät selvästi pienemmiksi kuin savisten koekappaleiden puristuslujuudet, vaikka käytetyt sideainemäärät olivat suuria. Hämeenlinnan turve lujittui paremmin kuin Honkasuon turve. Lentotuhka ei juuri parantanut Honkasuon turpeen puristuslujuuksia, kun lentotuhkan ja sementin seoksella saavutettavia lujuuksia verrataan pelkällä sementillä saavutettaviin lujuuksiin. Puristuslujuudet jäivät jopa hieman pienemmiksi kuin pelkällä sementillä saavutettavat lujuudet, kun lentotuhkaa oli 100 kg/m³. Hämeenlinnan turve lujittui hieman paremmin lentotuhkan ja sementin seoksella kuin pelkällä sementillä.

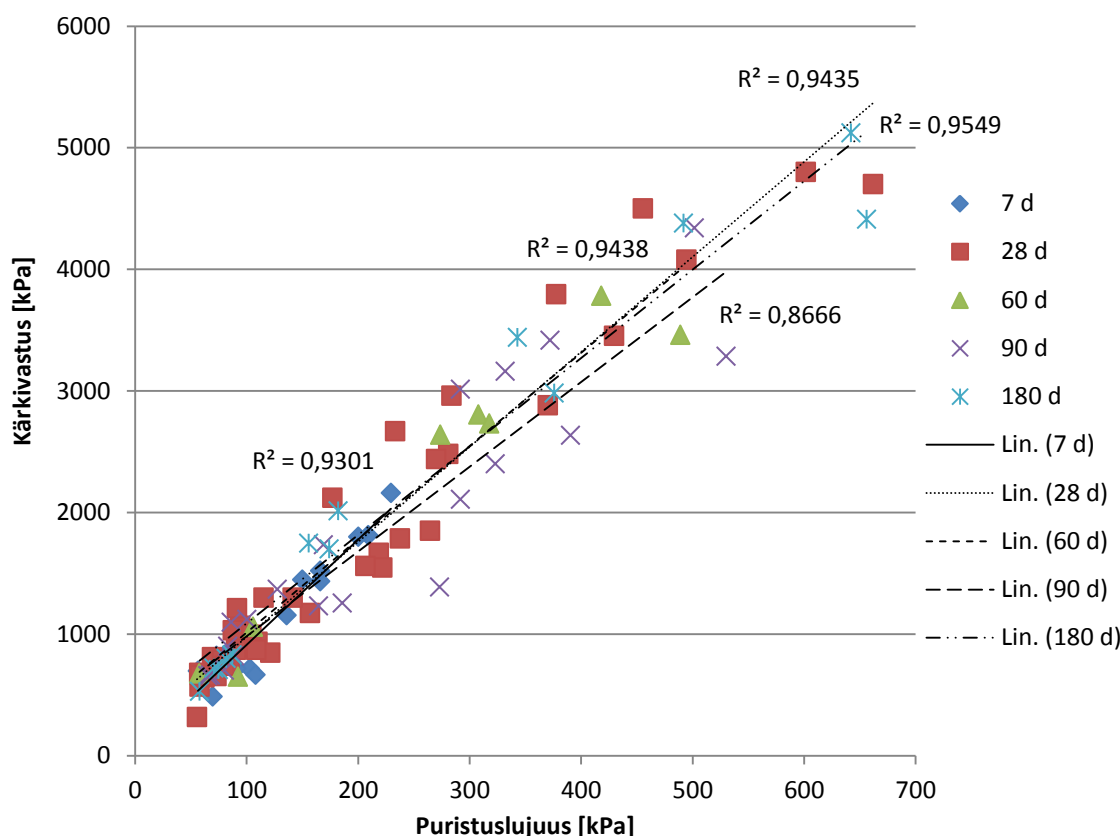
Turpeiden puristuslujuuksissa esiintyi enemmän hajontaa kuin savisten koekappaleiden puristuslujuuksissa. Hajontaa esiintyi sekä rinnakkaiskoekappaleiden välillä että samalla sideainereseptillä stabiloitujen, mutta eri-ikäisten koekappaleiden välillä. Turvekoekappaleiden esikuormitukseen liittyy virhetekijöitä. Koekappaleen päällä oleva ja putkessa kuorman alla liikkuva kansi saattaa jäädä jumiin, jolloin esikuormitus ei onnistu täysin. Tällöin koekappale ei painu täydellisesti, jolloin se ei myöskään tiivisty kunnolla, ja koekappaleen lujuus jää pieneksi. Lisäksi koekappaleet lujittuvat melko nopeasti, ja suurin painuma tapahtuu ensimmäisen vuorokauden aikana. Esikuormituksen tulee siis

tapahtua mahdollisimman pian sekoitustyön jälkeen. Turpeen kokoonpuristuma vaikuttaa myös turvekoekappaleen vesipitoisuuteen, sillä paljon painuneesta kappaleesta suotautuu enemmän vettä kuin vähän painuneesta kappaleesta. Myös vesipitoisuus vaikuttaa saavutettavaan lujuuteen. Lisäksi turpeen rakenne on luonnostaan epähomogeenisempaa kuin saven. Niinpä stabiloidun turvekappaleen lujuuteen vaikuttaa esimerkiksi koekappaleessa olevien maatumattomien kasvinosien osuus maatumasta massasta.

Jännitys-muodonmuutoskuvaajat on kokonaisuudessaan esitetty liitteessä 3 ja koekappalenumerointi liitteessä 1.

5.1.4 Penetrometrimääritys

Penetrometrimäärityksestä saatavan kärkivastuksen (q_c) ja puristuslujuuden välistä yhteyttä eri-ikäisillä puristuskoekappaleilla on kuvattu kuvassa 63. Kaaviossa ovat mukana kaikki runkoaineet ja sideainereseptit.



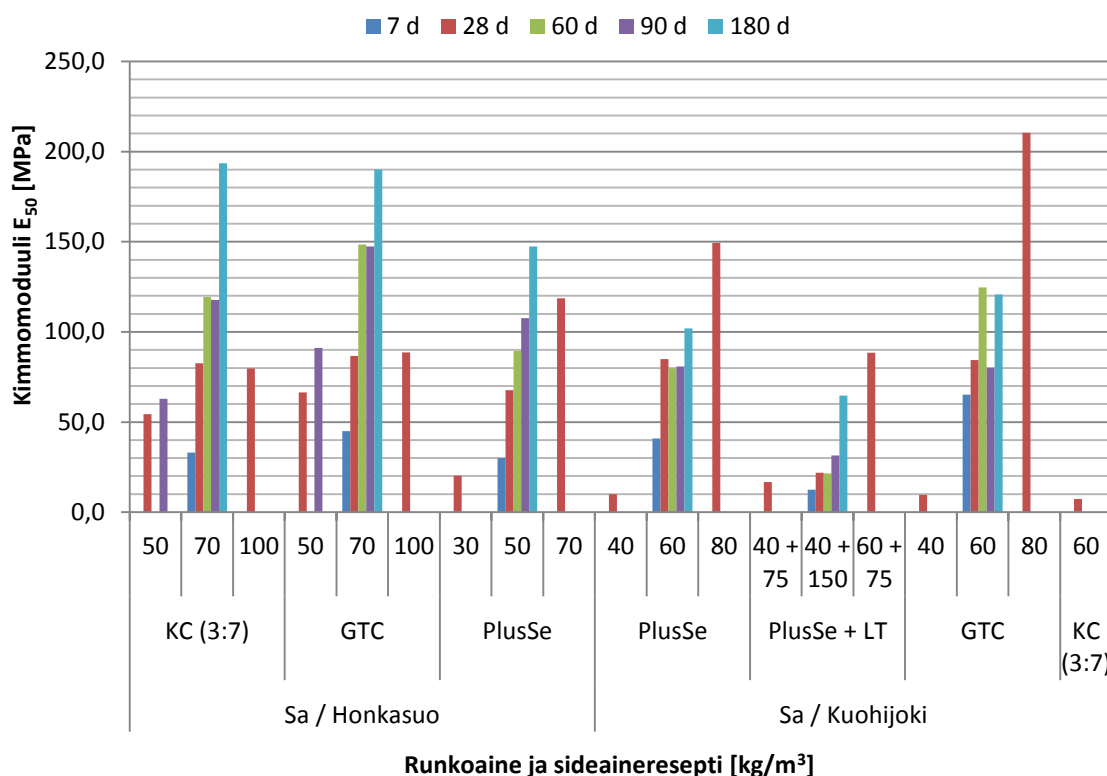
Kuva 63: Kärkivastuksen ja penetrometrilujuuden suhde eri-ikäisillä koekappaleilla.

Kun penetrometrituloksia vertaillaan yksiaksiaalisiin puristuskoetuloksiin, havaitaan, että määrityksissä käytetty penetrometrillä saatiin karkeasti noin 10-kertaisia tuloksia. Tulokset vastasivat toisiaan parhaiten, kun penetrometrilukema asettui penetrometrin mitta-asteikon puolivälin läheisyyteen. Mikäli koekappale oli niin luja tai pehmeä, että lukema oli selvästi mitta-asteikon ylä- tai alapäässä, poikkesivat puristimella ja penet-

rometrillä saatavat tulokset eniten. Tällaisissa tapauksissa koekappaleen lujuus joko ylitti tai alitti erikokoisten jousien luotettavan mittausalueen. Joidenkin lujien ja hauraiden savikoekappaleiden kärkeväsus jäi puristuslujuutta selvästi pienemmäksi. Tällaisia heikkoja tuloksia aiheutti koekappaleen pinnan lohkeilu penetrometrin kärjen alla. Korrelaatiokertoimista havaitaan, että tuloksissa oli melko vähän hajontaa. Eniten hajontaa esiintyi turvekoekappaleiden tuloksissa, mikä oli odotettavissa puristuslujuustulosten perusteella.

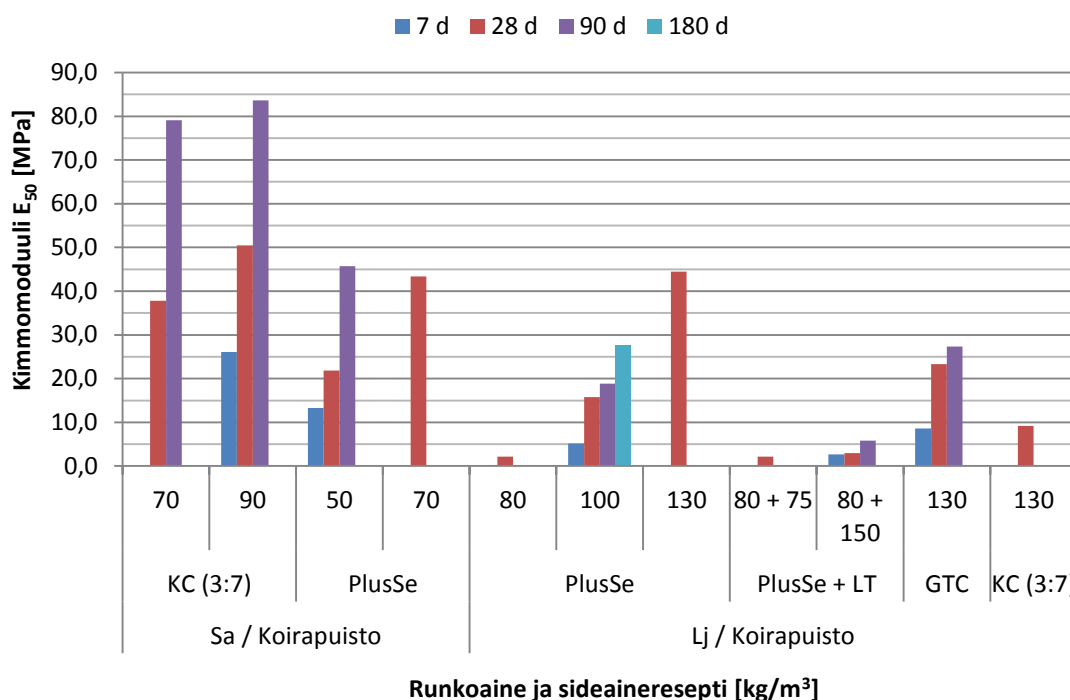
5.1.5 Muodonmuutosominaisuudet

Honkasuon ja Kuohijoen savien puristuslujuus-muodonmuutoskuvaajista määritetyt kimmomoduulit on esitetty kuvassa 64. Rinnakkaiskoekappaleiden kimmomoduulit on esitetty kaaviossa tulosten keskiarvona.



Kuva 64: Honkasuon ja Kuohijoen savien kimmomoduulit stabiloinnin jälkeen.

Koirapuiston saven ja liejun kimmomoduulit on esitetty kuvassa 65.

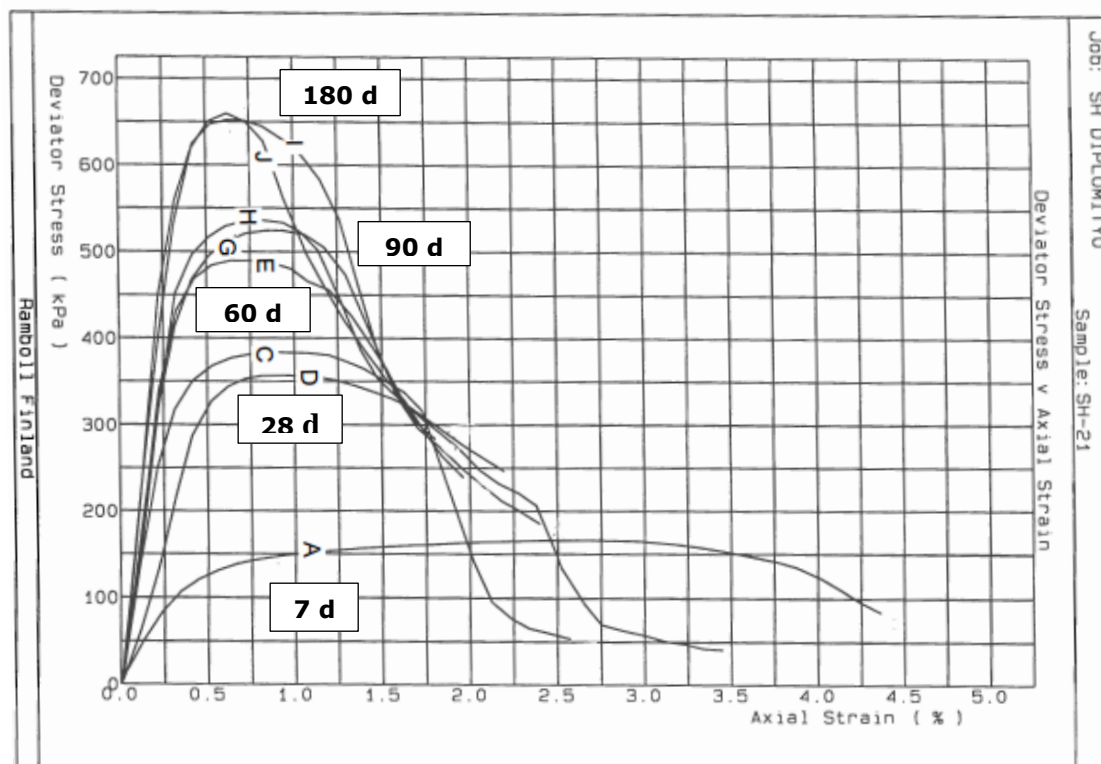


Kuva 65: Koirapuiston koekappaleiden kimmomoduulit.

Kimmomoduuleja kuvaavat pylväät noudattavat samoja trendejä ja muotoja kuin puristuslujuuksia kuvaavat pylväät. Suurimmat kimmomoduulit saavutettiin samoilla sideaineresepteillä kuin suurimmat puristuslujuudet. Vastaavasti puristuslujuuden ollessa pieni myös kimmomoduuli jäi pieneksi.

Lieju ei käyttäytynyt yhtä jäykästi kuin muut saviset runkoaineet. Liejun muodonmuutokset olivat suuria ja puristuslujuudet suhteellisen pieniä, jolloin puristuslujuuden ja muodonmuutoksen suhdetta kuvaava kimmomoduuli jäi pieneksi. Liejun kimmomoduuleihin vaikutti todennäköisesti myös jo puristuslujuuksia käsittelevässä luvussa mainittu huokoisuus. Ilmahuokokset lisäsivät todennäköisesti jonkin verran muodonmuutoksia, mutta niiden vaikutus jäi melko pieneksi.

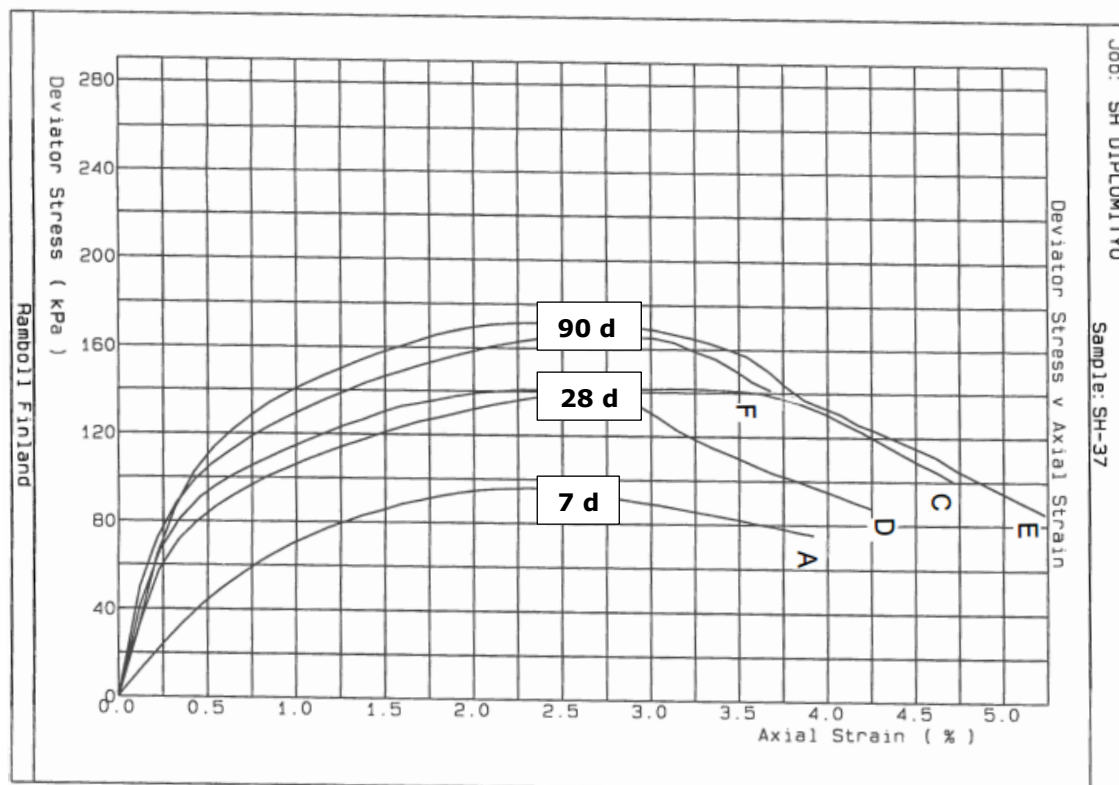
Kuvissa 66 ja 67 on esitetty kahden kuormituksessa eri tavalla käyttäytyvän savisen runkoaineen jännitys-muodonmuutoskuvaajat. Kuvassa 66 ovat GTC:llä (70 kg/m³) stabiloidun Honkasuon saven puristuslujuus-muodonmuutuskäyrät 7 - 180 vuorokauden iässä.



Kuva 66: GTC:llä stabiloidun Honkasuon saven jännitys-muodonmuutuskäyrät.

Kuvasta nähdään, että saven puristuslujuus ja jäykkyys lisääntyivät lujittumisajan kasvaessa. Muodonmuutokset olivat aluksi suuria ja puristuslujuus pieni. Maa käyttäytyi sitkeästi. Koekappaleen iän lisääntyessä puristuslujuus kasvoi ja käyrä nousi alkuperäistä jyrkemmin. Puristuslujuus saavutettiin pienemmillä muodonmuutoksilla kuin aluksi. Saven jäykkyys kasvoi, ja murtuminen tapahtui hauraasti ja äkillisesti. Maa ei siis kestänyt murtumatta yhtä suuria muodonmuutoksia kuin aluksi.

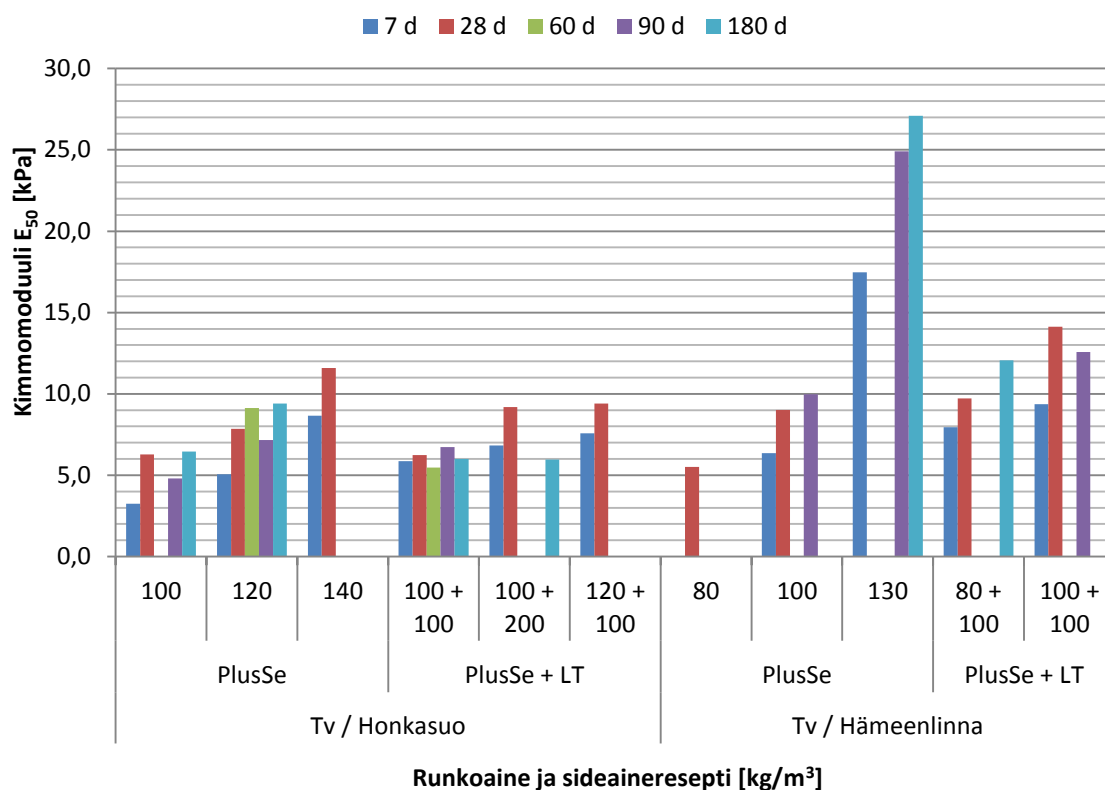
Kuvassa 67 on esitetty GTC:llä (130 kg/m^3) stabiloidun Koirapuiston liejun jännitys-muodonmuutuskäyrät 7 - 90 vuorokauden iässä.



Kuva 67: GTC:llä stabiloidun Koirapuiston liejun jännitys-muodonmuutoskäyrät.

Myös liejun puristuslujuus kasvoi ja suhteellinen muodonmuutos pieneni lujittumisajan kasvaessa. Stabiloitu lieju käyttäytyi vielä 90 vuorokauden iässä kuitenkin varsin sitkeästi, eli se kesti melko suuria muodonmuutoksia murtumatta. Tällainen maa ei siis menetä murtotilan jälkeen lujuuttaan nopeasti, eikä murtotila ole helposti havaittavissa käyrästä. Puristuslujuus ja kimmomoduuli kasvoivat iän lisääntyessä, mutta murtotilan muodonmuutokset pysyivät melko suurina.

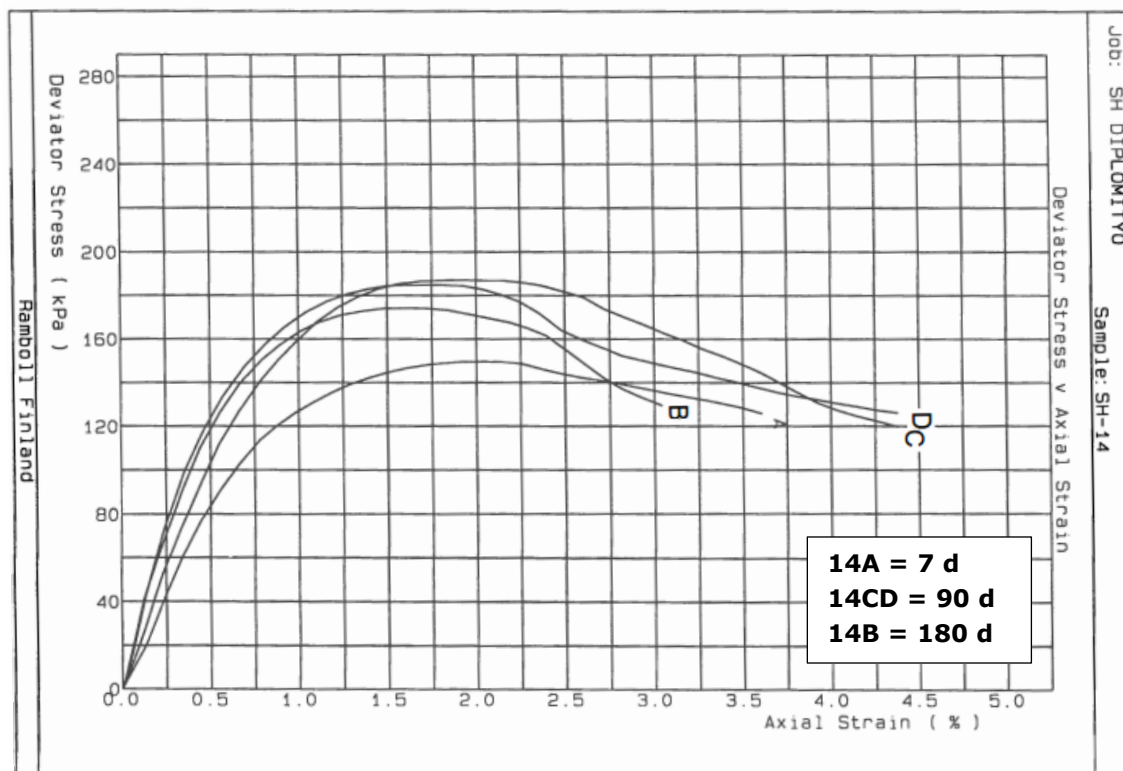
Turpeen jännitys-muodonmuutoskuvaajista määritetyt kimmomoduulit on esitetty kuvassa 68.



Kuva 68: Turpeiden kimmomoduulit eri sideaineresepteillä ja eri-ikäisenä.

Myös turpeen kimmomoduuleja kuvaavat pylväät noudattavat samoja trendejä ja muotoja kuin puristuslujuuksia kuvaavat pylväät. Moduulit jäivät selvästi pienemmiksi kuin savikoekappaleiden moduulit. Turpeiden kimmomoduulit olivat suuruusluokaltaan suurin piirtein samaa kokoluokkaa kuin liejun pienimmät moduulit.

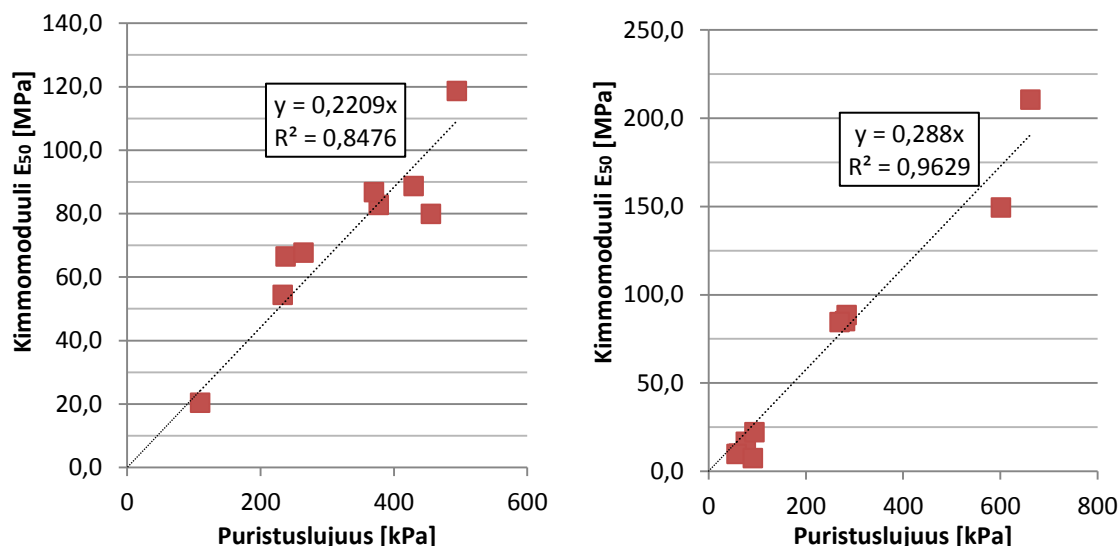
Kuvassa 69 on esitetty sementillä (130 kg/m^3) stabiloidun Hämeenlinnan turpeen jännitys-muodonmuutoskuvaajat 7 - 180 vuorokauden iässä.



Kuva 69: Sementillä stabiloidun Hämeenlinnan turpeen jännitys-muodonmuutoskäyrät.

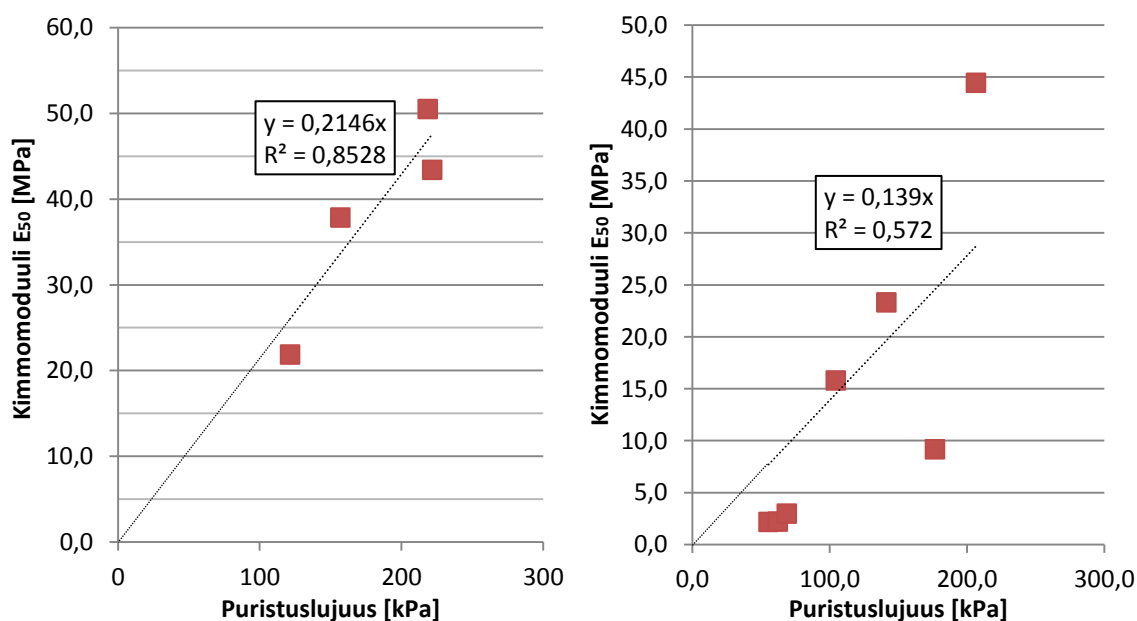
Stabiloidut turpeet painuivat kuormituksessa suhteellisen paljon, ja puristuslujuus jäi melko alhaiseksi. Kimmomoduulit olivat siten melko pieniä. Kuvasta havaitaan stabiloiduille turpeille tyypillinen jännitys-muodonmuutoskäyrän muoto. Käyrä nousee melko loivasti, eikä murtotila ole helposti havaittavissa. Muodonmuutos on suuri suhteessa jännitykseen. Maa käyttäytyy sitkeästi, eikä menetä lujuuttaan nopeasti murtotilassa. Puristuslujuus ja jäykkyys kasvavat ajan myötä. Turpeiden suhteellinen muodonmuutos murtotilassa oli tyypillisesti noin 2 - 5 %.

Honkasuon ja Kuohijoen savien puristuslujuuden ja kimmomoduulin välistä yhteyttä 28 vuorokauden iässä on havainnollistettu kuvassa 70. Kaavioissa ovat mukana kaikki si-deainereseptit.



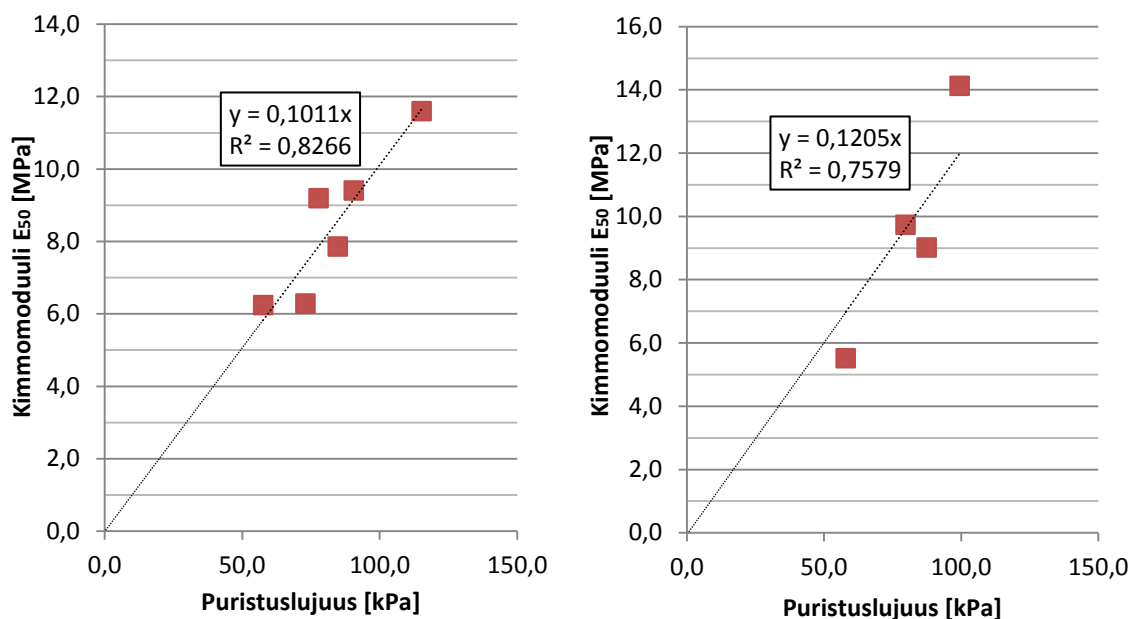
Kuva 70: Honkasuon (vasemmalla) ja Kuohijoen (oikealla) savien puristuslujuuksien ja kimmomoduulien suhde 28 vuorokauden iässä.

Koirapuiston saven ja liejun puristuslujuuden ja kimmomoduulin välinen suhde 28 vuorokauden iässä on esitetty kuvassa 71. Kaavioissa ovat mukana kaikki sideainereseptit.



Kuva 71: Koirapuiston saven (vasemmalla) ja liejun (oikealla) puristuslujuuksien ja kimmomoduulien suhde 28 vuorokauden iässä.

Kuvassa 72 on esitetty turvekoekappaleiden kimmomoduulien ja puristuslujuuksien suhde 28 vuorokauden kuluttua stabiloinnista.

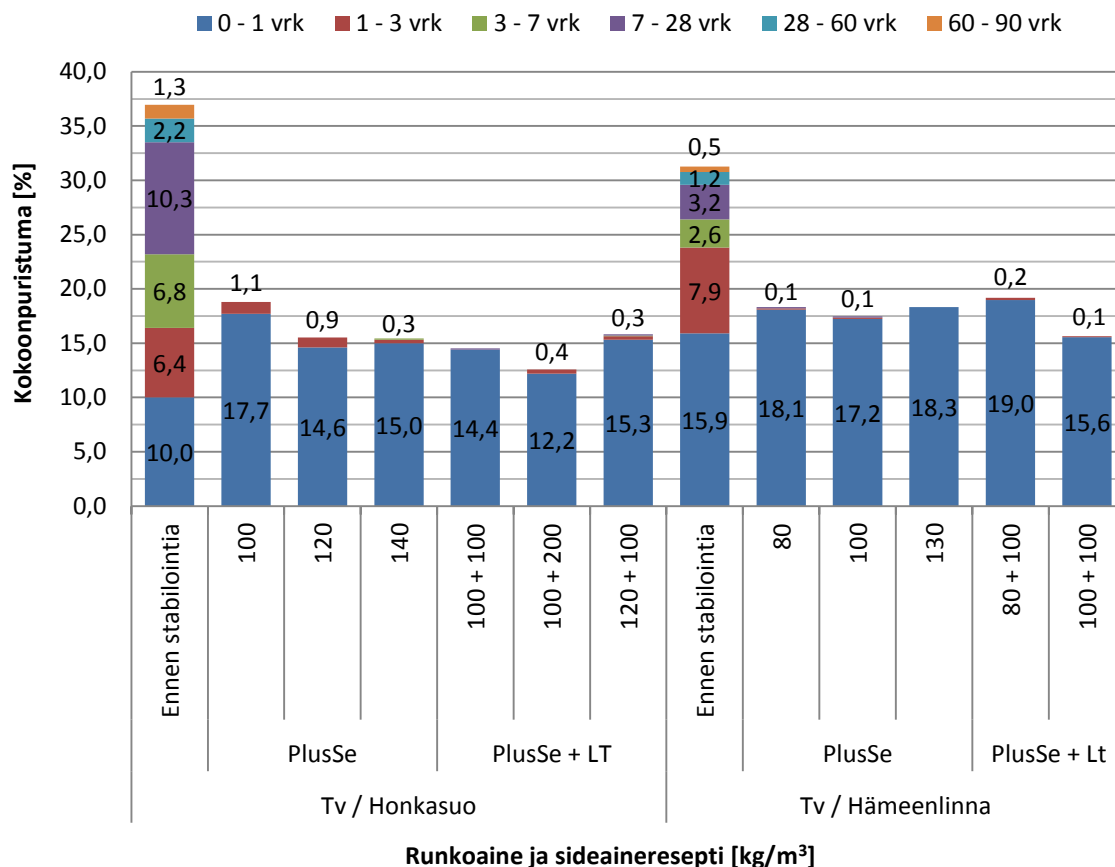


Kuva 72: Honkasuon (vasemmalla) ja Hämeenlinnan (oikealla) turpeiden puristuslujuuksien ja kimmomoduulien suhde 28 vuorokauden iässä.

Savien kimmomoduulit olivat noin 160 - 600 -kertaisia leikkauslujuuksiin nähden, kun oletetaan, että leikkauslujuus on puolet puristuslujuudesta. Liejun kimmomoduulit olivat noin 70 - 400 -kertaisia leikkauslujuuksiin nähden. Turvekappaleiden kimmomoduulit olivat noin 100 - 300 -kertaisia leikkauslujuuksiin verrattuna. Kerroin vaihteli melko paljon saman runkoaineen tuloksissa.

5.1.6 Turpeiden kokoonpuristuma

Kuvassa 73 on esitetty turpeiden kokoonpuristumat ennen sideaineen lisäystä ja stabiloinnin jälkeen sideaineresepteittäin. Turvekoekappaleiden kokoonpuristuma laskettiin kuormituksen aikana tapahtuvan painuman ja turvekoekappaleen alkuperäisen korkeuden suhteena. Tuloksissa eriteltiin eri aikoina tapahtunut painuma. Koska yhtä sideainereseptiä kohti valmistettiin useita koekappaleita, laskettiin saman reseptin painumien keskiarvona. Myös stabiloimattomista turpeista valmistettiin kaksi rinnakkaiskappaleita satunnaisten vaihtelun vaikutuksen poistamiseksi. Keskiarvosta merkittävästi poikkeavat tulokset poistettiin tuloksista.



Kuva 73: Turpeiden kokoonpuristuma prosenteina suhteessa aikaan.

Kuvasta nähdään, että stabilointi vähensi merkittävästi turpeiden kokoonpuristumaa. Stabiloidut kappaleet painuivat eniten ensimmäisen vuorokauden aikana, ja 3 vuorokauden jälkeen lähes koko painuma oli tapahtunut. Ensimmäisten 3 vuorokauden jälkeen painumista tapahtui hyvin vähän. Joissakin stabiloiduissa turvekoekappaleissa havaittiin kokoonpuristumaa vielä 28 - 180 vuorokauden välillä, mutta kokoonpuristuma tällä aikavälillä oli kaikilla koekappaleilla alle 1 %. Tällaisia tuloksia ei ole esitetty kaaviossa taulukon tulkittavuuden parantamiseksi. On myös huomioitava, että käytetyn määrittämenetelmän mittaustarkkuus ei ole kovin hyvä, eivätkä pienimmät tulokset ole siis tarkkoja. Ennen stabilointia määritetyistä painumista nähdään, että stabiloimattoman turpeen painuminen jatkuu merkittävästi pidempään kuin stabiloitujen turpeiden painuminen. Painumien kehittyminen on myös tasaisempaa kuin stabiloiduilla turpeilla, sillä melko suuria painumia havaittiin myös kuukauden kuormitusajan jälkeen.

Honkasuon turpeen painumat olivat pienimmät suurimmilla sideainemäärillä. Tämä selittyy suuren sideainemäärän hyvällä lujittamiskyvyllä, joka näkyy myös pienenä painumana. Toisaalta kokoonpuristuma jäi joissakin tapauksissa pieneksi todennäköisesti koekappaleen kannen jumittumisen vuoksi. Jos painuma oli suuri muihin saman reseptin koekappaleisiin verrattuna, oli koekappale usein myös lujempi kuin muut vastaavat koekappaleet. Hämeenlinnan turpeen painumissa on vain pieniä eroja. Kuvasta havai-

taan, että lentotuhkan ja sementin seoksella stabiloidut turpeet painuivat vähemmän kuin pelkällä sementillä stabiloidut turpeet. Vaikka lentotuhka ei merkittävästi lisännyt kummankaan turpeen puristuslujuutta, pienensi se hieman esikuormituksessa syntyvää painumaa.

5.1.7 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyysmääritysten tulokset on esitetty taulukossa 14 ja kokonaisuudessaan liitteessä 5. Vedenläpäisevyysmääritysten koekappalenumerointi on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 14: Kolmen saven ja yhden turpeen vedenläpäisevyyskertoimet ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Runkoaine	Vedenläpäisevyyskerroin $k_{20^{\circ}\text{C}}$ [m/s]		
	Ennen stabilointia	28 d	90 d
Sa / Honkasuo	$10^{-9,2} / 6,3\text{E}-10$	$10^{-9,3} / 5,2\text{E}-10$	-
Sa / Koirapuisto	$10^{-9,3} / 5,0\text{E}-10$	$10^{-8,9} / 1,2\text{E}-9$	$10^{-9,0} / 9,0\text{E}-10$
Sa / Kuohijoki	$10^{-9,0} / 9,0\text{E}-10$	$10^{-8,9} / 1,4\text{E}-9$	-
Tv / Honkasuo	$10^{-9,4} / 4,1\text{E}-10$	$10^{-8,1} / 7,5\text{E}-9$	$10^{-7,8} / 1,6\text{E}-8$

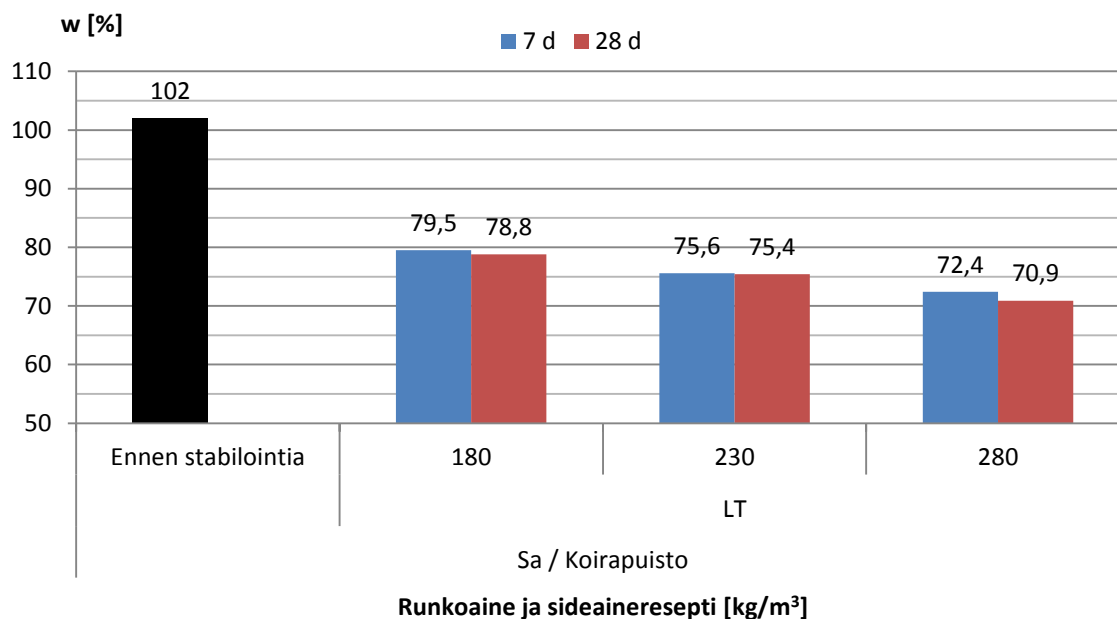
Honkasuon, Koirapuiston ja Kuohijoen savien vedenläpäisevyydet pysyivät lähes samansuuruisina. Erot ennen stabilointia ja eri aikoina stabiloinnin jälkeen määritettyjen vedenläpäisevyyskertoimien välillä olivat pieniä. Honkasuon turpeen vedenläpäisevyys oli sen sijaan stabilointia edeltävää tilannetta suurempi sekä 28 että 90 vuorokauden kuluttua stabiloinnista.

Alkuperäisiin, ennen stabilointia määritettyihin vedenläpäisevyyskertoimiin sisältyy stabiloituja koekappaleita enemmän epävarmuutta, sillä runkoaineet olivat ennen stabilointia hyvin pehmeitä. Ne painuivat melko runsaasti määrittämisen aikana. Kaikissa määrittämissä tehokkaana jännityksenä käytettiin 20 kPa. Tällä haluttiin simuloida karkeasti yleisintä stabiloinnin jälkeistä tilannetta, jossa stabiloidun kerroksen päällä on kuormaa. Tehokas jännitys oli sama myös ennen stabilointia tehdyissä määrittämissä, jotta tulokset olivat vertailukelpoisia. Turpeiden osalta turvekerroksessa näytteenottotasolla vallitseva tehokas jännitys on käytettyä tehokasta jännitystä pienempi turpeen pienen tilavuuspainon vuoksi, mutta koska stabiloimatonta turvekoekappaletta ei esikuormitettu, tasaantuu ero hieman.

5.2 Kiinteitetyn saven tutkimusohjelma

Lentotuhkalla kiinteitetyn saven puristuslujuudet jäivät niin alhaisiksi, ettei niitä voitu luotettavasti määrittää. Eniten sideainetta sisältäneiden (280 kg/m^3) 28 d ikäisten koekappaleiden puristuslujuus oli alle 6 kPa. Myöskään penetrimääritystä ei voitu tehdä. Tutkimusohjelman tulokset on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 2.

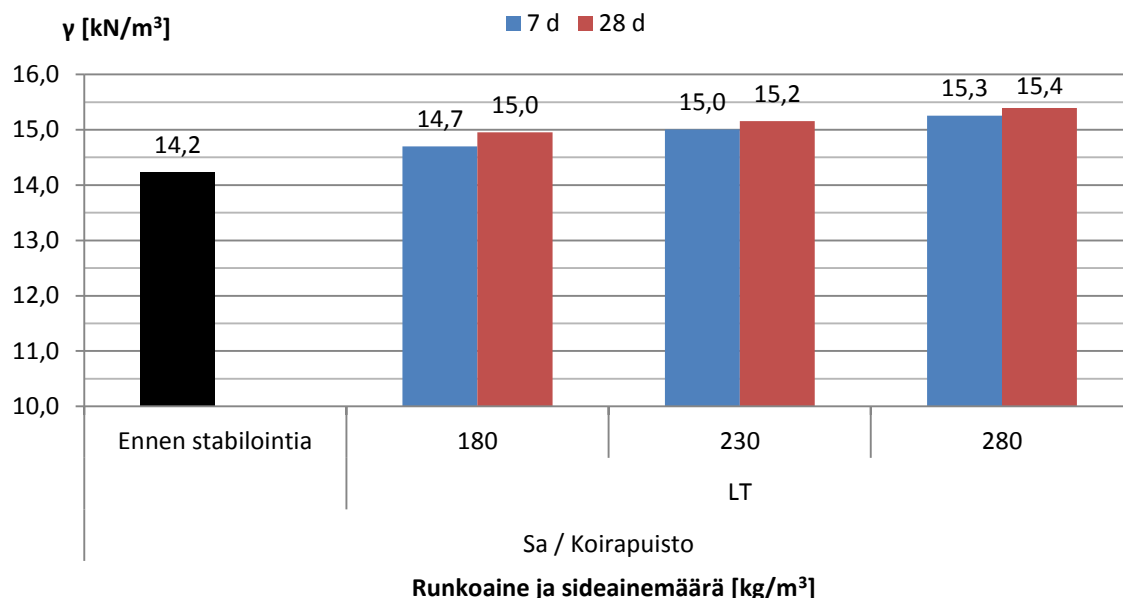
Kuvassa 74 on esitetty vesipitoisuusmääritysten tulokset eri-ikäisillä kappaleilla.



Kuva 74: Kiinteitetyn saven vesipitoisuusmäärittysten tulokset.

Havaitaan, että vesipitoisuus pieneni suhteessa sideaineen määrään ja lujittumisaikaan. Muutos oli suurin suurta lentotuhkamäärää käytettäessä 28 vuorokauden iässä. Erot 7 ja 28 vuorokauden tulosten välillä ovat hyvin pienet. Vesipitoisuus pieneni selvästi enemmän kuin kaupallisilla sideaineilla pohjanvahvistusohjelmassa. Toisaalta kiinteytyksessä käytetyt lentotuhkamäärät ovat moninkertaisia pohjanvahvistusohjelman sideainemääriin. Kuten pohjanvahvistusohjelmassa, myös kiinteitetyn saven kohdalla arvioitiin sideainereaktioihin sitoutuneen veden laskennallista määrää. Reaktioihin sitoutuneen veden laskennallinen osuus oli vain muutamia prosentteja muutoksesta, ja vesipitoisuuden pieneneminen aiheutui pääasiassa kuiva-aineksen osuuden lisääntymisestä.

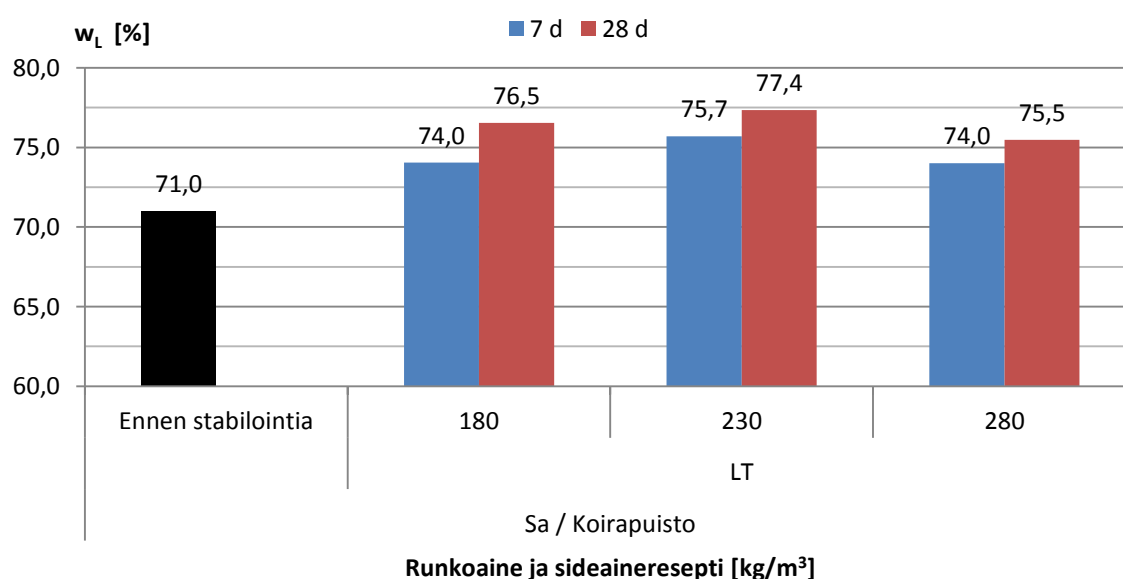
Kuvassa 75 on esitetty kiinteitetyn saven tilavuuspainot.



Kuva 75: Kiinteitetyn saven tilavuuspainot ennen ja jälkeen stabiloinnin.

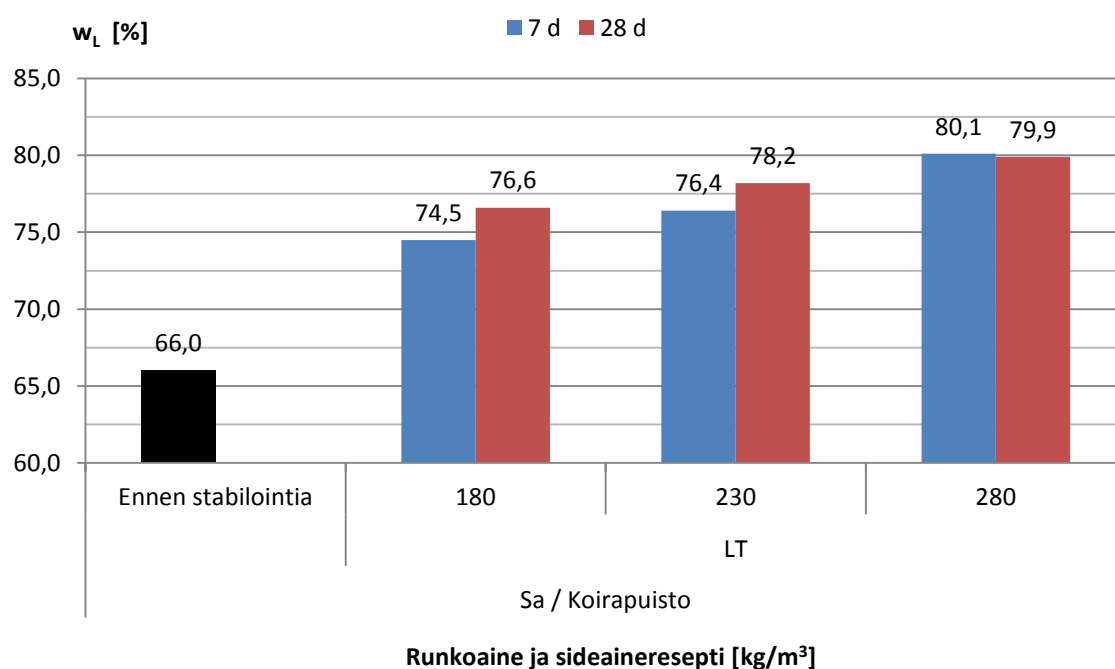
Myös tilavuuspainot kasvoivat enemmän kuin pohjanvahvistusohjelmassa, mikä on loogista, kun huomioidaan erot käytetyissä sideainemäärissä. Sekä vesipitoisuudet että tilavuuspainot jatkoivat muutostaan 7 ja 28 vuorokauden välillä, mikä viittaa siihen, että maassa tapahtuu yhtä reaktioita, jotka sitovat vettä. Vesipitoisuus pienenee, kun reaktioihin sitoutuu vettä, ja myös tilavuuspaino kasvaa, kun kiintoaineksen suhteellinen määrä kasvaa vesipitoisuuden pienentyessä.

Kuvassa 76 on esitetty kiinteitetyn saven Casagranden koputuskojeella määritetyt juoksurajat.



Kuva 76: Casagranden koputuskokeella määritetyt juoksurajat ennen ja jälkeen stabiloinnin.

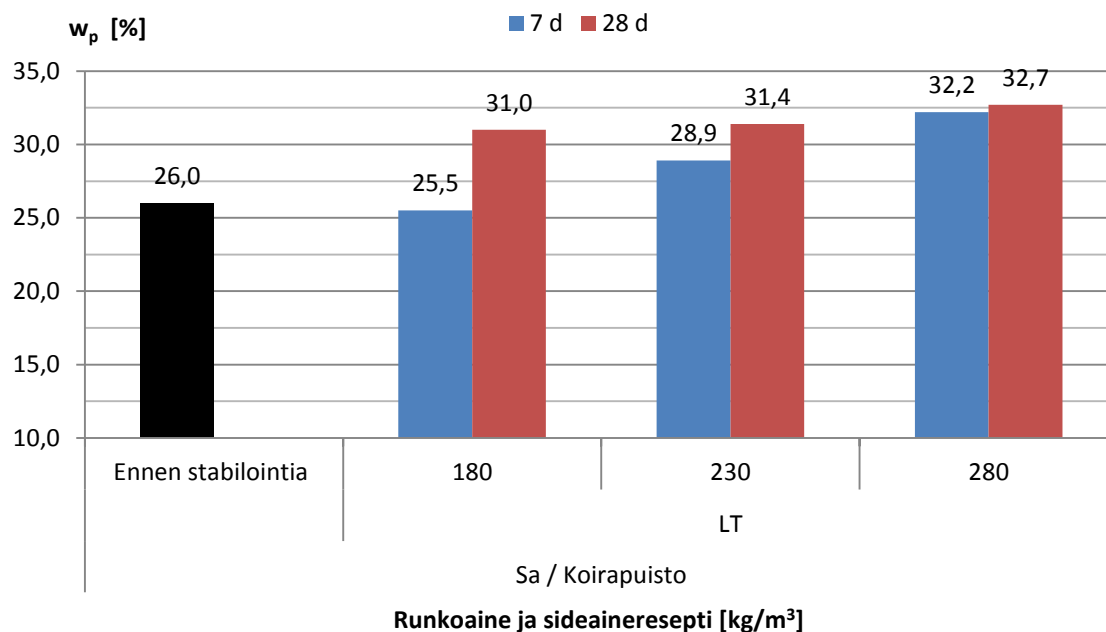
Juoksurajat kasvoivat selvästi vähemmän kuin pohjanvahvistusohjelmassa. Ero alkupe-
räiseen juoksurajaan oli melko marginaalinen. Pienimmillä lentotuhkamäärillä saadut
tulokset antavat viitteitä, että juoksuraja kasvaisi suhteessa sideainemäärän kasvuun.
Suurimmalla sideainemäärällä saadut juoksurajat ovat kuitenkin samansuuruisia pie-
nimmän lentotuhkamäärän tulosten kanssa. Toisaalta erot ovat kaiken kaikkiaan niin
pieniä, että ne voivat johtua satunnaisesta vaihtelusta. Juoksurajat määritettiin vertailuk-
si myös kartiokokeella hienouslukuna (kuva 77), jotta tulosten luotettavuutta voitiin
arvioida. Myös Koirapuiston saven alkuperäinen juoksuraja (hienousluku) on esitetty
tässä yhteydessä.



Kuva 77: Kartiokokeella määritetyt hienousluvut ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Kartiokokeella saadut juoksurajat (hienousluku) kasvavat lentotuhkamäärän kasvaessa. Erot koputuskokeella saatuihin tuloksiin ovat varsin pieniä, ja todellisten juoksurajojen voidaan päätellä olevan kuvissa 76 ja 77 esitettyssä suuruusluokassa.

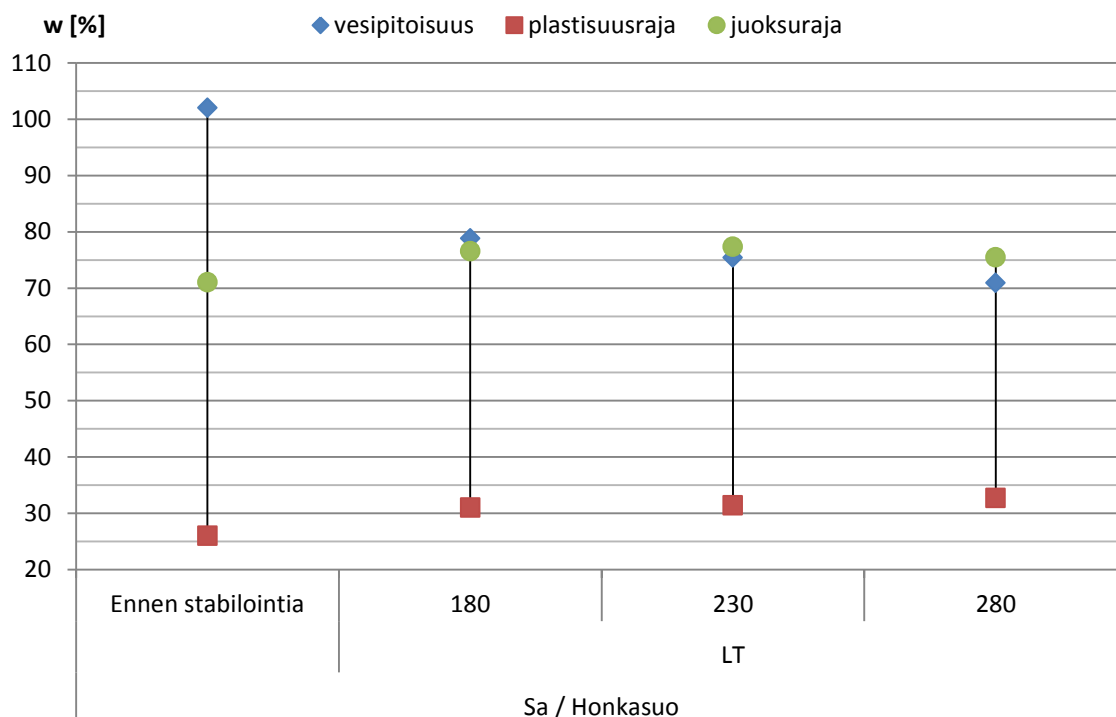
Kuvassa 78 on esitetty kiinteytetyn saven plastisuusrajat.



Kuva 78: Kiinteytetyn saven plastisuusrajat ennen ja jälkeen stabiloinnin.

Myös plastisuusrajat näyttäisivät kasvavan suhteessa lentotuhkamäärän kasvuun, ja myös ne jäivät selvästi pienemmiksi kuin pohjanvahvistusohjelmassa saadut plastisuusrajat.

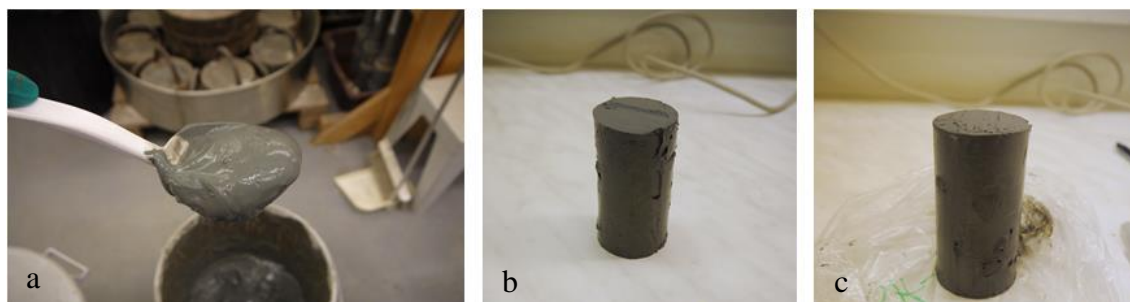
Kuvassa 79 ovat lentotuhkalla kiinteytetyn Koirapuiston saven vesipitoisuudet sekä juoksu- ja plastisuusrajat.



Kuva 79: Kiinteitetyn Koirapuiston saven vesipitoisuudet sekä juoksu- ja plastisuusrajat ennen ja jälkeen stabiloinnin.

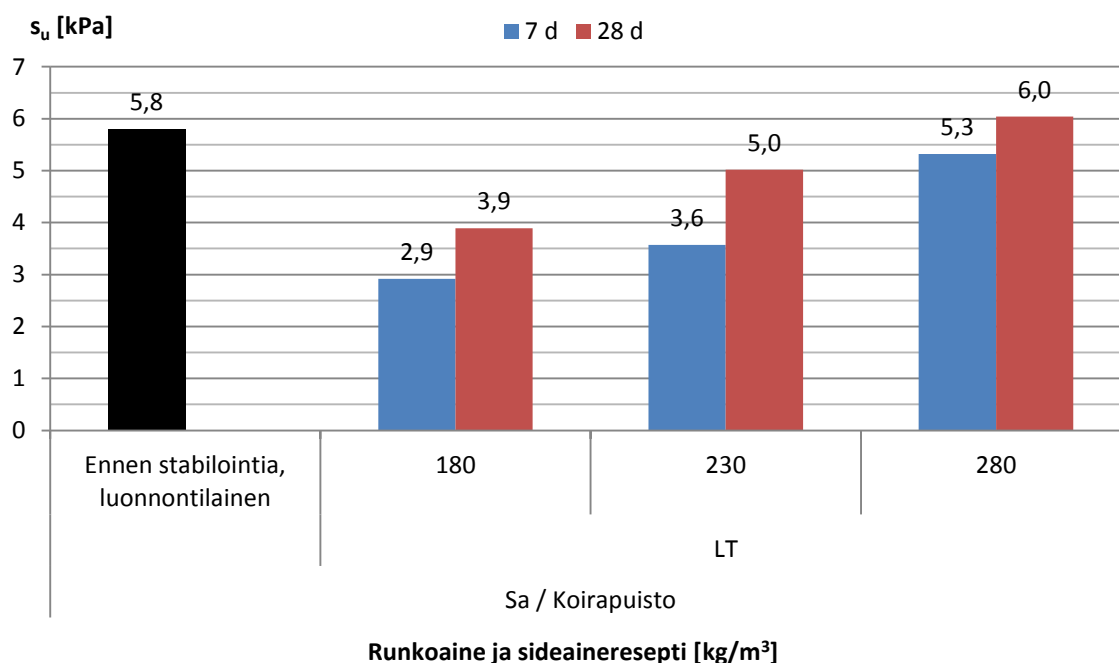
Kuvasta havaitaan, että Koirapuiston savi muuttui kiinteytyksen jälkeen juoksevasta konsistenssista plastisempaan suuntaan. Savi oli kiinteytyksen jälkeen juuri ja juuri plastisessa konsistenssissa tai lähellä sitä. Plastinen alue pysyi lähes samansuuruisena kuin ennen stabilointia, mutta se nousi hieman alkuperäistä ylemmäs vesipitoisuusasteikolla. Tällöin maa pystyy pidättämään alkuperäistä enemmän vettä muuttumatta juoksevaksi. Konsistenssin muutos näyttäisi johtuvan tässä tapauksessa eniten vesipitoisuuden pienenemisestä, ja konsistenssirajojen kasvun vaikutus on pienempi kuin pohjanvahvistusohjelmassa.

Kuvassa 80 on havainnollistettu kiinteitetyn saven konsistenssin muutosta. Kuvasta nähdään, että ennen stabilointia täydellisesti häiritty näyte on juoksevassa tilassa, kun stabiloinnin jälkeen sen ”häiriintymätön” olomuoto on selvästi alkuperäistä kiinteämpi.

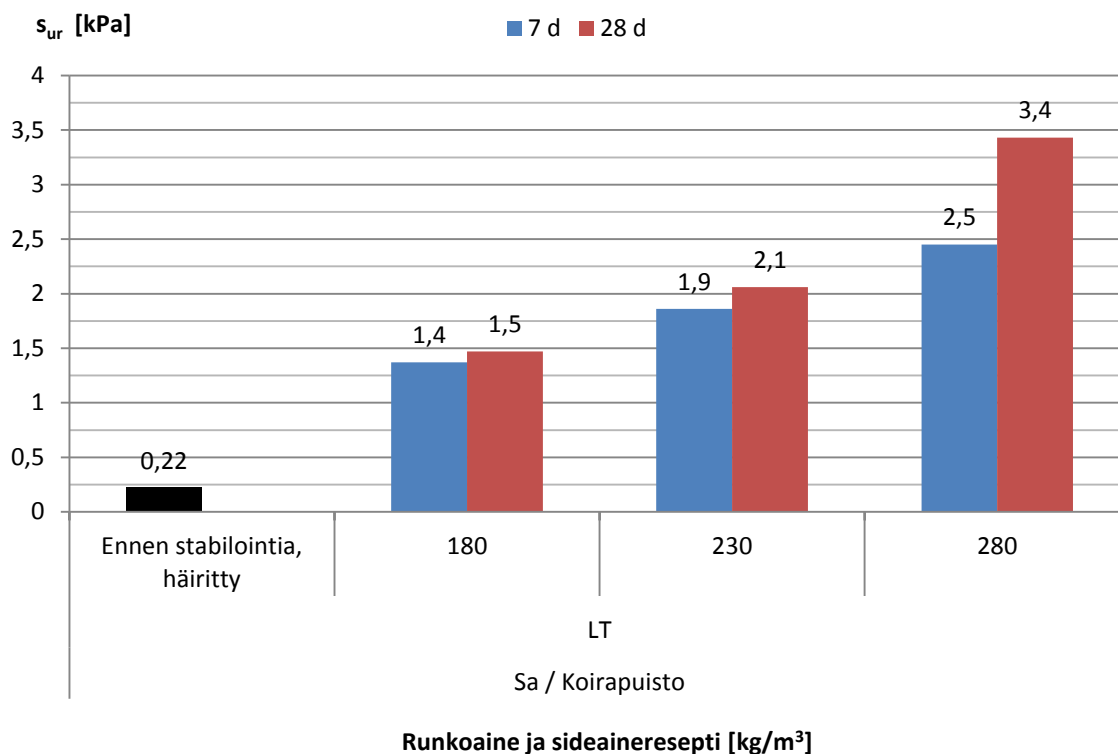


Kuva 80: Koirapuiston saven konsistenssin muuttuminen juoksevasta plastiseksi: a) savi ennen stabilointia, b) 7 vuorokautta stabiloinnin jälkeen, kun sideainemäärä oli 180 kg/m^3 , c) 7 vuorokautta stabiloinnin jälkeen, kun sideainemäärä oli 280 kg/m^3 .

Kiinteytetystä savesta voitiin määrittää kartiokokeella myös suljetut leikkauslujuudet, sillä savi oli kiinteytyksen jälkeen yhä kartiokokeeseen sopivalla lujuusalueella. Pohjanvahvistusohjelman savet olivat poikkeuksetta niin lujia, että kartiokokeen mittausalue ei riittänyt luotettavaan määrittelyyn. Kuvissa 81 ja 82 on esitetty kiinteytetystä savesta määritetyt suljetut leikkauslujuudet ”häiriintymättömässä” ja häirityssä tilassa. Häiriintymättömällä tilalla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että määrittely tehtiin koe-kappaleputkessa sekoittamatta tai häiritsemättä kiinteytettyä savea. Sideainereaktioissa syntyneet sidokset olivat siis ehjiä. Kuvassa 81 on lisäksi esitetty häiriintymättömästä maakerroksesta siipikairalla määritetty redusoitu leikkauslujuus (luonnontilainen leikkauslujuus) vertailuksi (Hakari & Dettenborn 2011). Häirityssä tilassa tehdyissä määrittelyissä savi oli sekoitettu ja häiritty huolellisesti ennen määrittelyä.



Kuva 81: Suljettu leikkauslujuus ennen stabilointia luonnontilaisessa, häiriintymättömässä maakerroksessa (redusoitu arvo) sekä kiinteytyksen jälkeen ”häiriintymättömässä tilassa”.



Kuva 82: Suljettu leikkauslujuus häirityssä tilassa ennen ja jälkeen kiinteytyksen.

Kuvan 81 suljettuja leikkauslujuuksia ei voida suoraan verrata toisiinsa, sillä ennen stabilointia määritetty suljettu leikkauslujuus kuvaa häiriintymättömän maakerroksen leikkauslujuutta. Stabiloinnin jälkeen määritetyt suljetut leikkauslujuudet kuvaavat stabilointia varten täysin häirityn ja tietyn ajan lujittuneen maan suljettua leikkauslujuutta.

Kuvasta 82 havaitaan, että Koirapuiston saven suljettu leikkauslujuus oli häirityssä tilassa erittäin pieni ennen stabilointia. Kun kuvan 81 stabiloinnin jälkeisiä tuloksia verrataan alkuperäiseen suljetun leikkauslujuuden arvoon häirityssä tilassa eikä luonnontilaisen maakerroksen arvoon, havaitaan, että kiinteytys lisäsi suljettua leikkauslujuutta, joskin leikkauslujuus jäi yhä varsin pieneksi. Kuvan 82 ennen ja jälkeen stabiloinnin määritettyjä suljetun leikkauslujuuden häirittyjä arvoja vertailemalla nähdään, että leikkauslujuus kasvoi häirityssäkin tilassa alkuperäiseen verrattuna, vaikka leikkauslujuudet jäivät edelleen pieniksi.

Kaikkien koekappaleiden sensitiivisyys oli stabiloinnin jälkeen noin 2, eli stabiloitu maa oli vähän sensitiivistä. Jos vertaillaan Koirapuiston saven siipikairalla määritettyä suljetun leikkauslujuuden redusoitua arvoa ja kartiokokeella määritettyä suljetun leikkauslujuuden häirittyä arvoa, sensitiivisyydeksi saadaan noin 26, joka tarkoittaa kohtalaisen häiriintymisherkkää savea. Voidaan siis todeta, että kiinteytys vähensi selvästi saven häiriintymisherkkyttä.

6 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI

6.1 Maan stabiloituvuudesta

Stabiloidun maan ominaisuudet riippuvat käytetyn sideainereseptin lisäksi sekoitustyöstä, lujittumisolosuhteista sekä stabiloitavan maan ominaisuuksista. Sekoitustyön ja lujittumisolosuhteiden vaikutus rajattiin työn ulkopuolelle. Kuten kirjallisuudessa (esim. Janz & Johansson 2002) on osoitettu, toimivat erilaiset sideaineet pääpiirteittäin samankaltaisesti. Erilaisten sideaineiden reaktiotuotteet ovat pääasiassa samoja, vaikka varsinaiset reaktiotavat eroavat jonkin verran toisistaan. Tämän vuoksi maa muuttuu eri sideaineilla stabiloitaessa samansuuntaisesti, vaikka muutoksen laajuus, kuten tietyn lujittumisaajan jälkeen saavutettava lujuustaso, vaihtelevat. Työssä käytettiin sementtiä, sementin ja kalkin seosta, sementin ja lentotuhkan seosta sekä GTC:tä, joka koostuu sementissä, sammutetusta kalkista ja kipsistä. Suurimmat sideainekohtaiset erot havaittiin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksissa, eivätkä indeksiominaisuuksien sideainekohtaiset erot olleet yhtä selviä.

Lentotuhkan ja sementin seoksella stabiloitujen runkoaineiden ominaisuudet poikkesivat eniten muista. Lentotuhkan määrä oli niin suuri, että jo alkuperäistä karkeamman kiintoaineksen määrän kasvu on todennäköisesti vaikuttanut tuloksiin. Esimerkiksi vesipitoisuudet pienenevät selvästi eniten lentotuhkaa ja sementtiä käytettäessä. Lentotuhka ei ole yhtä reaktiivista kuin sementti, joten kun lentotuhkalla korvataan sementtiä, vähenee sideaineseoksen reaktiivisuus todennäköisesti ainakin lyhyellä aikavälillä. Tämä voitiin havaita tuloksista, sillä pohjanvahvistusohjelmassa esimerkiksi konsistenssirajat ja lujuus muuttuivat vähemmän kuin kaupallisia sideaineita käytettäessä. Lisäksi kiinteytetyn saven ominaisuudet muuttuivat selvästi vähemmän kuin kaupallisilla sideaineilla stabiloitujen runkoaineiden, vaikka lentotuhkan määrä oli suuri. Lentotuhkan aktivointiin käytettävän sementin merkitys maan stabiloituvuuteen on siis suuri. Kaupalliset sideaineet käyttäytyivät melko samankaltaisesti keskenään, mikä on varsin loogista, sillä myös seossideaineet sisälsivät melko paljon sementtiä, ja myös kalkki ja kipsi ovat lentotuhkaa reaktiivisempia.

Vertailtaessa erilaisilla sideaineilla saavutettavia ominaisuuksia voidaan todeta, että maa-aineksen tyyppi vaikuttaa eniten käytettäessä sideaineita, jotka reagoivat potsoaanisesti maan mineraalien kanssa. Pääasiassa huokosveden kanssa reagoivat sideaineet eivät ole yhtä herkkiä maan tyyppille. Toisaalta esimerkiksi Chew'n et al. (2004) tutkimus antaa viitteitä, että myös sementtistabiloinnissa maan mineraalikoostumus (savimineraalit) vaikuttaa maan ja sideaineen välisiin reaktioihin.

Tässä työssä saatuja ja muiden raportoimia tuloksia vertailtaessa tulee huomioida pohjoismaisten geologisten olojen omaleimaisuus. Suomalaiset maa-ainekset eroavat monilta ominaisuuksiltaan muualla maailmassa tavattavista maa-aineksista. Siksi suora vertailu pohjoismaiden ulkopuolella ei ole mahdollista. Toisaalta myös suomalaisilla ja ruotsalaisilla runkoaineilla tehdyt tutkimukset (esim. Åhnberg 2006; Hassan et al. 2008; Hassan & Ravaska 2009) ovat osoittaneet, että stabilointi muuttaa maan ominaisuuksia pohjimmiltaan samoin reaktiomekanismein kuin Pohjoismaiden ulkopuolella. Pohjoismaiset maa-ainekset käyttäytyvät siis stabiloitaessa tiettyyn pisteeseen saakka samoin kuin muullakin. Työn kirjallisuusselvitysosiossa on kuitenkin esitetty, että stabiloitavan maan ominaisuudet vaikuttavat maan stabiloituvuuteen ja stabiloidun maan ominaisuuksiin. Esimerkiksi muutokset konsistenssissa näyttävät riippuvan voimakkaasti maan mineraalikoostumuksesta, ja myös muiden luokitus- ja geoteknisten ominaisuuksien sekä mineralogian välillä näyttäisi olevan yhteys, kuten esimerkiksi Thompson (1967), Brandl (1981) ja Chew et al. (2004) ovat osoittaneet.

Savimineraalien vaikutusta maan stabiloituvuuteen ja stabiloidun maan ominaisuuksiin ei kuitenkaan ole tutkittu suoraan vertailukelpoisissa olosuhteissa syntyneillä savilla. Toisaalta tiedetään, että suomalaiset savet sisältävät pääasiassa illiittia sekä joissakin tapauksissa kloriittia ja vermikuliittia. Sridharanin (2002) mukaan eri savimineraaleista montmorilloniitin ja kaoliniitin reaktiivisuus ja siten stabiloituvuus eroavat eniten toisistaan. Erot aiheutuvat näiden mineraalien kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Åhnbergin (2006) tutkimuksessa ei varsinaisesti tutkittu savimineraalien vaikutusta stabiloituvuuteen, mutta tutkimuksessa käytettyjen savisten näytteiden mineraalikoostumus tunnetaan. Kaikki kolme savista runkoaineita olivat illiittisiä. Runkoaineet poikkesivat indeksi- ja kemiallisilta ominaisuuksilta toisistaan. Kaksi runkoaineista oli savia ja yksi savinen lieju. Samankaltaisesta mineraalikoostumuksesta huolimatta runkoaineiden stabiloituvuus vaihteli.

Tässä tutkimuksessa määritetyt stabiloidun maan luokitus-, lujuus-, muodonmuutos-, ja vedenläpäisevyysominaisuudet vaihtelivat runkoaineesta, sideainereseptistä sekä lujittumisajasta riippuen. Osa runkoaineista lujittui helpommin kuin toiset, ja toisten runkoaineiden luokitusominaisuudet muuttuivat enemmän kuin toisten, vaikka sideaineresepit vastasivat toisiaan. Kaiken kaikkiaan tulokset olivat varsin loogisia ja erot melko pieniä, mutta erojen syitä on joissakin tapauksissa vaikea arvioida. Erot selittyvät runkoaineiden välisillä eroavaisuuksilla, sillä myös sekoitus- ja lujittumisolosuhteet pysyivät vakioina, mutta tiettyä stabiloituvuuteen vaikuttavaa syytä on vaikea nimetä.

Runkoaineiden alkuperäiset ominaisuudet, kuten vesipitoisuus ja konsistenssi vaihtelivat melko paljon. Tiedetään, että esimerkiksi runkoaineen vesipitoisuus ja orgaanisen aineksen määrä sekä koostumus vaikuttavat maan stabiloituvuuteen. Tässä työssä liejun havaittiin lujittuvan savisista runkoaineista selvästi heikoimmin, ja syy löytynee or-

gaanisesta aineksesta. Lisäksi esimerkiksi saven konsistenssi vaikuttaa siihen, kuinka helposti sideaine sekoittuu maahan. Pehmeään ja plastiseen maahan sideaine sekoittuu tehokkaammin kuin lähes kiinteään maahan, vaikka tällainen maa muuten stabiloituisi heikommin. Myös maan savilajitepitoisuuden ja siten plastisuuden on raportoitu (Broms 1986; Little 1995; Esrig 1999) vaikuttavan stabiloituvuuteen.

Runkoaineiden mineralogista koostumusta ei tunnettu, mutta saaduista tuloksista ei voitu päätellä, että nimenomaan maan mineraalikoostumus olisi vaikuttanut stabiloituvuuteen. Koska suomalaisessa maaperässä esiintyy rajoitettu määrä erilaisia savimineraaleja, ja nämä mineraalit eivät edusta ominaisuuksiltaan savimineraalien ääripäitä, vaikuttaisi siltä, että mineraalikoostumuksen vaikutus stabiloituvuuteen on suomalaisissa olosuhteissa melko vähäinen varsinkin jos huomioidaan kaikki muut maan stabiloituvuuteen vaikuttavat tekijät. Niinpä tämän työn tulosten avulla mineraalien vaikutusta stabiloituvuuteen ei voida osoittaa.

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi tulee huomioda, että maasto-olosuhteissa maan stabiloituvuuteen vaikuttaa monia tekijöitä, joita tässä, laboratorio-olosuhteissa tehdyssä tutkimuksessa ei ole voitu huomioda. Yleisesti tiedetään, että laboratoriossa saavutettava lujuustaso on suurempi kuin maasto-olosuhteissa. Myös vedenläpäisevyys on todellisessa rakenteessa tyypillisesti suurempi kuin laboratorio-olosuhteissa. On vielä epäselvää, kuinka suuri merkitys runkoaineen ominaisuuksilla on verrattuna varsinaisen stabiloitumisen onnistumiseen, kuten sekoitustyön tasalaatuisuuteen, kun arvioidaan työmaalla saavutettavaa lujuustasoa.

6.2 Luokitusominaisuuksien tarkastelu

Tutkimukset (esim. Chew et al. 2004; Åhnberg 2006; Hassan et al. 2008) ovat osoittaneet, että maan vesipitoisuus pienenee stabiloitaessa, ja tässä tutkimuksessa saadut tulokset tukevat näitä havaintoja. Muutoksen suuruus riippui runkoaineesta sekä käytetystä sideainereseptistä. Tässä työssä havaittiin, että savisilla runkoaineilla suurin osa vesipitoisuuden muutoksesta aiheutuu lisääntyneestä kuiva-ainespitoisuudesta. Reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli laskennallisesti vain muutamia prosentteja. GTC:tä käytettäessä sekä vesipitoisuuden muutos että reaktioihin sitoutuneen veden määrä olivat pienimmät. Kalkin ja sementin seos vähensi vesipitoisuutta eniten, ja myös laskennallinen reaktioihin sitoutuneen veden osuus oli tällöin suurin. Toisaalta sideainekohtaiset erot olivat yleisesti pieniä. Turpeilla reaktioihin sitoutuneen veden osuus vaikuttaisi olevan suurempi kuin savilla, joskin turpeiden säilytystapa mahdollisti sekä veden suotautumisen että veden haihtumisen koekappaleen yläpäästä, mikä heikentää tulosten vertailtavuutta.

Maan tilavuuspainon muutos aiheutuu lähinnä kuiva-aineksen määrän kasvusta. Turpeilla tilavuuspaino kasvoi enemmän kuin savisilla runkoaineilla. Muutokset vesipitoi-

suudessa ja tilavuuspainossa tapahtuvat pääosin ensimmäisen viikon kuluessa stabiloinnista, joskin kirjallisuuden ja reaktioihin sitoutuvan veden pienen määrän perusteella voidaan päätellä, että muutokset tapahtunevat pääosin välittömästi stabiloinnin jälkeen. Esimerkiksi Hassanin et al. 2008 tutkimuksessa osa määrittämisistä tehtiin välittömästi stabiloinnin jälkeen, jolloin suurin muutos indeksiominaisuuksissa oli jo tapahtunut. Sideainekohtaisten erojen arviointi oli mahdotonta, koska tilavuuspainot muuttuivat hyvin vähän, eikä määrittämismenetelmän mittaustarkkuus ollut suuri. Havainnot pätevät sekä pohjanvahvistus- että kiinteitetyn saven tutkimusohjelmassa saatuihin tuloksiin, ja ne ovat yhteneviä esim. Åhnbergin (2006) ja Hassanin et al. (2008) esittämien havaintojen kanssa.

Kiinteitetyn saven tutkimusohjelmassa saaduista vesipitoisuus- ja tilavuuspainotuloksista voidaan päätellä, että lentotuhkalla kiinteitettyssä maassa reaktiot jatkuvat 7 ja 28 vuorokauden välillä. Tämä voitiin havaita jatkuvana vesipitoisuuden pienenemisenä ja tilavuuspainon kasvuna, vaikka muutos oli pientä verrattuna ensimmäisen 7 vuorokauden aikana tapahtuvaan. Näin selviä muutoksia eri lujittumisikoina tarkastelluissa luokitelominaisuuksissa ei havaittu pohjanvahvistusohjelmassa. Tulokset ovat yhteneviä sen kanssa, että potsolaanisen lentotuhkan reaktiot ovat tunnetusti hitaita ja pitkäkestoisia.

Tutkimuksessa tehdyt konsistenssirajoja koskevat havainnot ovat pääosin yhteneviä kirjallisuudessa kuvattujen havaintojen (esim. Brandl 1981; Locat et al. 1996; Chew et al. 2004) kanssa. Plastisuusraja kasvoi kaikissa tutkituissa tapauksissa, ja kaikkien runkoaineiden juoksuraja kasvoi lukuun ottamatta Koirapuiston liejua. Liejun poikkeavaan käyttäytymiseen vaikutti todennäköisesti sen sisältämä orgaaninen aines, joka pystyy pidättämään mineraalista ainesta enemmän vettä. Sideainereaktioiden aiheuttamat muutokset saven rakenteessa ja vedenpidätyskyvyssä eivät ilmeisesti ole niin suuria, että niiden vaikutus ylittäisi orgaanista ainesta sisältävän maan luontaisen vedenpidätämissäkyvyn, vaan se pikemminkin hieman heikkenee. Toisaalta myös mineralogisen koostumuksensa vuoksi erittäin plastisten savien juoksurajan on raportoitu pienenevän (esim. Sivapullaiah et al. 2000) Kiinteitetyn saven kohdalla jo kuiva-aineksen osuuden merkittävä kasvu ja vesipitoisuuden pieneneminen sideainelisyksen yhteydessä vaikuttanee konsistenssin ja maarakennusominaisuuksien parantumiseen.

Stabilointi siis vaikuttaa kahdella tavalla positiivisesti saven konsistenssiominaisuuksiin: juoksu- että plastisuusraja pääsääntöisesti kasvavat, ja vesipitoisuus pienenee. Maa pystyy siis pidättämään alkuperäistä enemmän vettä ilman, että sen konsistenssi muuttuu juoksevaksi, ja samalla vesipitoisuus pienenee kohti plastista tai kiinteää konsistenssia. Tämän lisäksi maan kuivumiskutistuminen vähenee, kun konsistenssi muuttuu alkuperäistä kiinteämmäksi, mikä vaikuttaa positiivisesti esimerkiksi vedenläpäisevyyteen (Lojander 1985).

Sen sijaan stabiloinnin vaikutus plastisen vesipitoisuusalueen laajuuteen eli plastisuuslukuun ei ole tulosten valossa yksiselitteinen. Pohjanvahvistusohjelmassa stabilointi ei juuri muuttanut Honkasuon ja Kuohijoen savien plastisuuslukua, tai se kasvoi. Kumpikin savista oli ennen stabilointia vähän plastisia. Koirapuiston runkoaineilla, jotka olivat kumpikin erittäin plastisia, stabilointi ei juuri vaikuttanut plastisuuslukuun, tai se pieneni hieman. Myöskään kiinteytetyn saven plastisuusluku ei juuri muuttunut stabiloitaessa. Samanaikaisesti esimerkiksi Chew et al. (2004) ja Little (1995) esittävät, että plastisuusluku pienenee stabiloitaessa, vaikka sekä juoksu- että plastisuusraja kasvaisivat. Brandl (1999) havaitsi, että kalkkistabiloidun maan plastisuusluku kasvoi, mikäli käytetty kalkkimäärä oli suuri, tai jos maa oli emäksistä. Toisaalta havainnot eivät koske pohjoismaisia savia, joten suora vertailu näihin tuloksiin ei ole mahdollista.

Tutkittujen suomalaisten savien ja savisen liejun plastisuusluvut eivät siis juuri muuttuneet alkuperäisestä, vaan plastinen alue vain nousi ylemmäs vesipitoisuusasteikolla. Toisaalta varsinkin pohjanvahvistusohjelman tuloksiin sisältyy jonkin verran epävarmuutta. Tuloksissa esiintyi hajontaa, eikä luotettava vertailu ollut mahdollista. Tämän vuoksi tulokset ovat lähinnä suuntaa antavia, eivätkä saadut konsistenssirajat ole täysin tarkkoja. Myös konsistenssirajojen sideainekohtainen arviointi oli vaikeaa pohjanvahvistusohjelmassa, jossa lujien koekappaleiden homogenisointi oli haastavaa. Kiinteytetyn saven konsistenssimääritysten tuloksia voidaan pitää luotettavampina kuin pohjanvahvistusohjelman tuloksia, sillä savi oli paremmin määrittelyyn soveltuvassa konsistenssissa. Tulee kuitenkin huomioida, että muutokset kiinteytetyn saven konsistenssirajoissa olivat hyvin pieniä, ja konsistenssin muutos aiheutui lähinnä vesipitoisuuden muutoksesta. Kiinteytetyn saven rakenne ja ominaisuudet eivät siis muuttuneet yhtä paljon kuin vertailussa käytetyssä kirjallisuudessa, eikä suora vertailu ole siksi mahdollista.

6.3 Lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien tarkastelu

Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet muuttuivat pohjanvahvistusohjelmassa merkittävästi enemmän kuin luokitusominaisuudet. Kaikkien tutkittujen runkoaineiden lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet olivat erittäin heikkoja ennen stabilointia. Lähtötilanteeseen verrattuna sekä puristuslujuudet (ja siten leikkauslujuudet) että kimmomoduulit paranivat vähintään monikymmenkertaisiksi kaikissa tutkituissa tapauksissa. Myös sideainekohtaiset erot olivat suuremmat kuin indeksiominaisuuksilla. Sideainekohtaiset erot tasoittuvat kuitenkin suurimmaksi osaksi 180 vuorokauden kuluessa.

Kuten kirjallisuudessa (esim. Åhnberg 2006; Hassan & Ravaska 2009), myös tässä tutkimuksessa havaittiin, että maan jäykkyys ja kimmomoduuli muuttuivat enemmän kuin lujuus. Savien kimmomoduulit olivat noin 160 - 600 -kertaisia leikkauslujuuksiin nähden, ja liejun kimmomoduulit olivat noin 70 - 400 -kertaisia leikkauslujuuksiin nähden. Turvekappaleiden kimmomoduulit olivat noin 100 - 300 -kertaisia leikkauslujuuksiin

verrattuna. Liikenneviraston syvästabiloinnin suunnitteluohjeessa (2010) todetaan, että lujittuneen massastabiloidun maan kimmomoduuli on usein 350 - 450 -kertainen stabiloidun maan leikkauslujuuteen nähden. Kun huomioidaan, että yllä esitetyt kimmomoduulit ovat laboratoriossa valmistettujen koekappaleiden moduuleja, voidaan tuloksia pitää melko loogisina. Laboratoriossa saavutettavat lujuudet ovat usein suurempia ja muodonmuutokset pienempiä kuin maastossa, koska sekoitus- ja lujittumisolosuhteet ovat laboratoriossa vakioidumpia kuin maastossa.

Savisten runkoaineiden lujuuskehitys jatkui pitkään ja 180 vuorokauden lujuudet olivat suurimmillaan yli kolminkertaisia 7 vuorokauden lujuuksiin verrattuna. Myös kimmomoduuli kasvoi merkittävästi pitkällä tarkasteluvälillä. Sen sijaan turpeiden lujuuskehitys oli pitkällä tarkasteluvälillä varsin vaatimatonta. Osassa tapauksista lähes lopullinen lujuustaso saavutettiin jo ensimmäisen viikon aikana. Turpeiden painumaominaisuudet paranivat merkittävästi verrattuna stabiloimattomaan turpeeseen. Kokonaispainuma lähes puolittui kummankin turpeen tapauksessa. Stabiloidun turpeen painuma tapahtuu suurimmaksi osaksi ensimmäisen lujittumisvuorokauden aikana, kun stabiloimaton turve painui merkittävästi ensimmäisen kuukauden ajan. Havainnot pätevät laboratorioolosuhteisiin sekä laboratoriomittakaavassa tehtyihin kokeisiin.

Puristuslujuustuloksista voidaan päätellä, että ainakin tutkituilla runkoaineilla vähän plastinen savi lujittui paremmin kuin erittäin plastinen savi. Erittäin plastisten savien savilajitepitoisuudet olivat myös suurimmat. Esimerkiksi Little (1995) & Esrig (1999) ovat tehneet samanlaisia havaintoja plastisuuden ja lujittumisen välisestä yhteydestä. Havaintoa tukee myös kirjallisuudessa (esim. Chew et al. 2004) esitetty yhteys korkean vesipitoisuuden ja heikon lujittumisen välillä, sillä erittäin plastisen maan vesipitoisuus on usein korkea.

Kiinteytetyn saven lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet paranivat nekin, mutta saavutettu lujuustaso jäi yhä erittäin alhaiseksi. Kiinteytetyn saven kohdalla luokitusominaisuuksissa saavutettiin merkittävämpiä parannuksia kuin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksissa. Toisaalta tutkimusohjelman tavoitteena oli parantaa saven käsittävyyttä ja maarakennusominaisuuksia, ei niinkään suoraan lujuutta. Kiinteytymiseen tähtäävässä stabiloinnissa on tarkoituksenmukaista, että maan ominaisuudet muuttuvat juuri sen verran, että käsittely helpottuu, ja sideainekustannukset pysyvät pieninä. Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että pehmeän ja juoksevassa konsistenssissa olevan saven ominaisuudet muuttuvat lentotuhkalla stabiloitaessa paremmin käsiteltävään muotoon. Käytetty lentotuhkamäärä oli suurimmillaan lähellä maksimimäärää, joka nykyisellä kalustolla on mahdollinen. Tästä huolimatta kiinteytetyn saven ominaisuudet muuttuivat selvästi vähemmän verrattuna kaupallisiin sideaineisiin ja tyypillisesti pohjanvahvistuksessa käytettäviin sideainemääriin.

Kiinteytetty savi muuttui juoksevasta juuri ja juuri plastiseksi. Sen suljettu leikkauslujuus kasvoi, vaikka jäikin vielä verrattain pieneksi. Saven häiriintymisherkkyys pieneni kuitenkin merkittävästi. Saavutetut ominaisuudet paransivat siis maan käsiteltävyyttä. Käyttökohteesta riippuen saavutettavat ominaisuudet saattaisivat riittää esimerkiksi maan kuljetettavuuteen. Toisaalta esimerkiksi optimaalista tiivistettävyyttä tuskin saavutettiin, sillä maan konsistenssi oli yhä lähellä juoksurajaa. Savien optimivesipitoisuus on usein niiden plastisella vesipitoisuusalueella, ja savi on parhaiten tiivistettävissä, kun konsistenssi on melko lähellä kiinteää. Osa tiivistysenergiasta kuluu plastisessa konsistenssissa saven muodonmuutoksiin, eikä tiivistyminen ole tehokasta. Aluksi vain huokosvedenpaine kasvaa, eikä tilavuudenmuutoksia tapahdu. Toisaalta kiinteässä konsistenssissa koheesion vaikutus on voimakas, eikä tiivistyminen ole tehokasta. (Tiehallinto 1968.) Kyseisen saven maarakennusominaisuuksia olisi todennäköisesti voitu parantaa edelleen esimerkiksi käyttämällä pientä sementtimäärää lentotuhkan aktivaattorina. Tällöin sideainekustannukset olisivat yhä jääneet verrattain pieniksi.

6.4 Vedenläpäisevyysominaisuuksien tarkastelu

Vedenläpäisevyys muuttui hyvin vähän tutkituissa savisissa runkoaineissa. Muutokset olivat niin pieniä, että niitä voivat selittää myös määrittystapaan liittyvät seikat. Sen sijaan turpeen vedenläpäisevyys kasvoi selvästi. Käytetty sideaine oli kaikissa tapauksissa sementti. Savet käyttäytyivät kuten kirjallisuudessa on esitetty, joskaan yhdessäkään tapauksessa vedenläpäisevyys ei pienentynyt alkuperäisen tason alapuolelle. Määritykset tehtiin 28 ja 90 vuorokauden iässä, ja esimerkiksi Hassan & Ravaska (2009) raportoivat sementtistabiloidun saven vedenläpäisevyyden pienentyneen jo 28 vuorokauden iässä. Toisaalta esimerkiksi Chew'n et al. (2004) tutkimuksessa saven vedenläpäisevyys pieneni 28 vuorokauden iässä 7 vuorokauden vedenläpäisevyyteen nähden, mutta jäi yhä alkuperäistä vedenläpäisevyyttä suuremmaksi.

Turpeen vedenläpäisevyys on luonnontilaisena yleensä noin 10^{-4} - 10^{-7} m/s. Kuorman alla turpeen vedenläpäisevyys kuitenkin pienenee nopeasti turpeen painuessa ja huokos-tilavuuden pienentyessä. (Kauranne et al. 1972.) Kuormituksen alaisena turpeen vedenläpäisevyys on tyypillisesti noin 10^{-8} m/s, mutta suuren ja pitkäkestoisen kuorman alla vedenläpäisevyys voi olla jopa 10^{-10} - 10^{-11} m/s (Munro et al. Roadex E-learning). Tässä työssä määritetty stabiloimattoman turpeen vedenläpäisevyys oli siis selvästi keskimääräistä pienempi. Sen sijaan stabiloimattomien savien vedenläpäisevyydet olivat varsin tyypillisiä suomalaisille saviille.

Stabiloimattoman maan vedenläpäisevyydet määritettiin samoilla gradientin ja tehokkaan jännityksen arvoilla kuin stabiloidun maan vedenläpäisevyydet. Savet ja turve olivat erittäin pehmeitä ennen stabilointia, ja ne painuivat melko paljon määrittelyn aikana. Tällaiset pehmeät koekappaleet käyttäytyvät koeksellissä siten, että ne painuvat sekä pysty- että vaakasuunnassa kasaan, koska sellissä vallitsee kolmiakselinen paine.

Koekappaleet eivät siis juuri laajene vaakasuunnassa, vaan koekappaleiden uuma kapeenee. Tällöin maan huokoisuus muuttuu, ja ennen stabilointia määritetty vedenläpäisevyys saattaa olla todellista pienempi. Stabiloidut koekappaleet olivat lujempia ja vähemmän alttiita muodonmuutoksille kuin stabiloimattomat koekappaleet. Siten vallitseva tehokas jännitys ei vaikuttanut niihin yhtä paljon kuin stabiloimattomiin koekappaleisiin. Toisaalta käytettyjen jännitystilojen tulisi olla samansuuruisia, jotta tulosten vertailu olisi mahdollista.

Turpeen vedenläpäisevyys muuttui eniten moninkertaistuen stabiloinnin jälkeen. Liitteestä 5 havaitaan, että vedenläpäisevyyden tasaantuminen oli turpeella hitaampaa kuin muilla runkoaineilla, eli se puristui eniten kokoon määrittämisen aikana. Tämä selittää osaltaan suurta muutosta vedenläpäisevyydessä. Kokoonpuristumisen vaikutusta pyrittiin vähentämään siten, että stabiloimattomaa turvetta ei esikuormitettu. Stabiloimattomaan turpeeseen kohdistui sellissä 20 kPa suuruinen paine. Stabiloidut turvekoekappaleet esikuormitettiin 18 kPa kuormalla. Vedenläpäisevyyskokeessa sellipaine oli sama 20 kPa, mutta sen vaikutus voidaan olettaa hyvin pieneksi, koska koekappaleet olivat lujittuneet 28 tai 90 vuorokautta ennen koetta. Stabiloimattomaan ja stabiloituun turpeeseen kohdistui siis sama, noin 20 kPa suuruinen jännitys. Stabiloitu maa lujittuu kuitenkin nopeasti, jolloin esikuormitus ei ehdi kokoonpuristaa koekappaleita pitkään. Esimerkiksi kuvasta 73 nähdään, että stabiloidun turpeen painuma tapahtuu lähes kokonaan ensimmäisen vuorokauden aikana. Tämän jälkeen turve painuu enää hieman, ja siinä olevat huokokset eivät enää pienene painumisen seurauksena, vaan ainoastaan reaktiotuotteiden täyttäessä huokosia. Stabiloimattoman turve sai siis painua pidempään kuin stabiloitu turve, mikä vaikuttanee tuloksiin.

Turpeen vedenläpäisevyys kasvoi myös 28 ja 90 vuorokauden välillä. Tätä voi selittää esimerkiksi 90 vuorokauden koekappaleen 28 vuorokauden koekappaleen huonompi tiivistyminen valmistuksen aikana. Turvekoekappaleilla havaittiin melko suuriakin eroja rinnakkaisten puristuskoekappaleiden tiiviyksissä, mikä johtuu esimerkiksi esikuormituksen ja sullontatyön onnistumisesta sekä turvemassan epähomogeenisuudesta.

Myös stabiloimattomat savet olivat erittäin pehmeitä, mutta ne painuivat sellissä vähemmän kuin turve. Savien vesipitoisuus on selvästi pienempi ja kiintoaineksen määrä suurempi kuin turpeen. Sellissä vallitseva jännitys ei siis voinut kokoonpuristaa savia yhtä paljon kuin turpeita, ja stabiloimattomien savien vedenläpäisevyyksiä voidaan pitää paremmin vertailukelpoisina kuin stabiloimattoman turpeen.

Kirjallisuudessa ja tässä tutkimuksessa saaduista tuloksista voidaan päätellä, että suomalaisten savien vedenläpäisevyys ei muutu merkittävästi stabiloitaessa savea sementillä. Myös muilla sideaineilla saavutettaneen samansuuntaisia tuloksia, joskin kalkkia käytettäessä vedenläpäisevyys saattaa kasvaa todennäköisemmin kuin muilla sideaineilla stabiloitujen maa-ainesten vedenläpäisevyys. Tutkimuksessa käytetyt sementtimäärät vas-

tasivat tyypillisiä pohjanvahvistuksessa käytettäviä määriä, eikä vedenläpäisevyyttä määritetty lentotuhkalla kiinteytetystä savesta. Leivon (2009) tutkimuksessa saatiin samankaltaisia tuloksia myös pienillä, alle 50 kg/m^3 sementtimäärillä. Hassanin & Ravaskan (2008) tutkimuksessa savien vedenläpäisevyydet pienenevät alkuperäiseen verrattuna vasta suuria, yli 100 kg/m^3 sementtimääriä käytettäessä, joskin savisen liejun vedenläpäisevyydet pienenevät jo sementtimäärää 50 kg/m^3 käytettäessä.

Vedenläpäisevyyksiä arvioitaessa tulee huomioda myös saven kuivumiskutistuminen, joka vähenee saven konsistenssin muuttuessa alkuperäistä kiinteämmäksi. Saven kuivumiskutistumistaipumuksen vähentyessä kuivumisen aiheuttama halkeilu vähenee, ja tällä on maan vedenläpäisevyyttä pienentävä vaikutus. Lisäksi tulee muistaa, että laboratoriossa saavutettavia vedenläpäisevyyden arvoja voidaan pitää tietylle maalle saavutettavissa olevan vedenläpäisevyyden alarajana. Esimerkiksi Leivo (2009) on raportoinut, että samalla sideainereseptillä laboratorio- ja maasto-olosuhteissa stabiloidun saven vedenläpäisevyyksissä oli selviä eroja. Maastossa saavutettiin selvästi laboratorio-olosuhteita suurempia arvoja.

6.5 Stabiloidun maan tutkimusmenetelmistä

Yksi työn tavoitteista oli selvittää nykyisten laboratoriomääritysmenetelmien soveltuvuutta stabiloidun maan ominaisuuksien tutkimiseen. Stabiloidun maan lujuuden määrittämiseen käytettiin menestyksekkäästi yksiaksiaalista puristuskoeetta, joka on vakiintunut menetelmä stabiloidun maan tutkimiseen. Yksiaksiaalisen puristuskokeen lisäksi lujuutta arvioitiin penetrometrimäärityksellä, jota on tyypillisesti käytetty lähinnä laadunvalvontatarkoituksissa. Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että penetrometrillä voidaan arvioida suuntaa-antavasti myös maan puristuslujuutta laitteen antaman kärkivastuksen avulla. Laboratorio-olosuhteissa laitteen ohjeistuksen mukaan laskettu kärkivastuksen arvo on noin 10-kertainen laboratoriossa määritettyyn puristuslujuuteen nähden. Tulosten perusteella saatu kerroin on kuitenkin vain suuntaa-antava, ja tulokseen vaikuttaa mm. tutkittavan maan hauraus. Määrityksessä tulee myös kiinnittää huomiota oikeankokoisen jousen valintaan, ja mitta-asteikon ääripäitä tulisi välttää, jotta tulokset ovat luotettavia. Tulokset pätevät vain työssä käytettyyn penetrometrityyppiin. Penetrometrin käyttö vaatii vertailututkimuksia ennen mittauksia tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi.

Lujuusominaisuuksia laajempaan tarkasteluun käytettiin stabiloimattoman maan tutkimiseen käytettäviä määritysmenetelmiä. Vesipitoisuus, tilavuuspaino, konsistenssiominaisuudet sekä vedenläpäisevyys määritettiin kuten luonnontilaiselle maalle. Nämä ominaisuudet tulee selvittää vain harvoin, ja silloinkin lähinnä kiinteytettävän maan tapauksessa. Vedenläpäisevyyden ja konsistenssin määrityksissä on omat haasteensa, sillä määritykset on tarkoitettu ensisijaisesti käsittelemättömälle maalle.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tuottaa lisää tietoa stabiloidun maan luokitus- ja geoteknisistä ominaisuuksista. Työ keskittyi massastabilointiin, vaikka samat maan ja sideaineen välisiin reaktioihin perustuvat mekanismit ja vaikutukset esiintyvät myös pilaristabiloidussa maassa. Kirjallisuuden ja laboratoriotutkimusten perusteella maan stabiloituvuudesta voidaan todeta, että

- Eri sideaineet toimivat pääperiaatteiltaan samankaltaisesti, mutta sideaineen soveltuvuus tiettyyn kohteeseen riippuu stabiloitavan maa-aineksen tyypistä, stabiloinnilla tavoiteltavista ominaisuuksista sekä esimerkiksi kohteen ominaispiirteistä.
- Tiedetyt tunnetut sideainereseptiikan reunaehdot sekä tietämys stabiloinnin aiheuttamista muutoksista maassa auttavat haarukoimaan toteutuskelpoisia vaihtoehtoja. Laboratoriossa tehdyt stabiloituvuustutkimukset ovat silti edelleen ainoa luotettava keino määrittää toteutuskelpoinen sideaineresepti.
- Stabiloitavan maan ominaisuudet vaikuttavat maan stabiloituvuuteen, mutta on epäselvää, kuinka suuri tämä vaikutus on verrattuna esimerkiksi sekoitustyön onnistumiseen tai lujittumisolosuhteisiin.

Stabiloinnin muuttaa maan indeksi- ja geoteknisiä ominaisuuksia seuraavasti:

- Vesipitoisuus pienenee, mutta vaikutus tilavuuspainoon on varsin vähäinen.
- Maan konsistenssi muuttuu. Juoksuraja useimmiten kasvaa, mutta jos maa on erittäin plastista tai se sisältää orgaanista ainesta, voi juoksuraja pienentyä. Plastisuusraja kasvaa kaikissa tapauksissa. Yhdessä vesipitoisuuden pienenemisen kanssa konsistenssi siirtyy kohti plastista tai kiinteää, ja maan rakenne pystyy pidättämään alkuperäistä enemmän vettä ilman, että se näkyy konsistenssissa. Tällöin maarakennusominaisuudet paranevat.
- Maan lujuus ja jäykkyys (kimmomoduuli E_{50}) kasvavat, ja muodonmuutokset vähenevät.
- Vedenläpäisevyys kasvaa usein lyhyellä aikavälillä, mutta reaktiotuotteiden täytessä maan huokosia vedenläpäisevyys pienenee ja usein jopa alkuperäistä alhaisemmalle tasolle. Jotta vedenläpäisevyyden muutosta voitaisiin luotettavasti arvioida, tulisi sekä stabiloidun että stabiloimattoman maan vedenläpäisevyys voida määrittää luotettavasti. Kummankin määrittämiseen liittyy joustavaseinämäisessä koejärjestelyssä virhetekijöitä.

Pohjanvahvistusohjelman tuloksista havaittiin, että

- Tutkituilla runkoaineilla vähän plastinen savi lujittui paremmin kuin erittäin plastinen savi. Heikoimmin lujittuneiden savien savilajitepitoisuudet olivat myös suurimmat.
- Työn pohjanvahvistusohjelmassa lujuus ja jäykkyys kasvoivat moninkertaisiksi alkuperäiseen verrattuna. Savisten koekappaleiden lujuus kehittyi pitkän ajan kuluessa (180 vuorokautta) merkittävästi. Turpeiden pitkän ajan lujuuskehitys oli selvästi vaatimattomampaa.
- Savien kimmomoduulit olivat noin 160 - 600 -kertaisia leikkauslujuuksiin nähden, ja liejun kimmomoduulit olivat noin 70 - 400 -kertaisia leikkauslujuuksien nähden. Turvekappaleiden kimmomoduulit olivat noin 100 - 300 -kertaisia leikkauslujuuksiin verrattuna.
- Myös indeksiominaisuudet muuttuivat merkittävästi, mutta eivät yhtä paljon. Tyypillisillä pohjanvahvistuksessa tavoiteltavilla lujuustasoilla maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet muuttuvat suhteellisesti enemmän kuin indeksiominaisuudet.
- Sideainemäärän pieni lisäys saattaa moninkertaistaa lujuuden ja jäykkyyden, mutta indeksiominaisuudet eivät juuri muutu tietyn kynnyksarvon jälkeen.
- Penetrometrimäärityksissä saatujen kärkivastusten havaittiin olevan noin 10-kertaisia laboratoriossa määritettyihin puristuslujuuksiin. Tieto mahdollistaa penetrometrin nykyistä laajemman käytön myös tapauksissa, joissa maan lujuutta halutaan arvioida absoluuttisesti eikä vain suhteessa muihin tuloksiin. Tulokset pätevät kuitenkin vain käytettyyn penetrometrimalliin. Penetrometrillä saatavan kärkivastuksen ja puristuslujuuden välistä korrelaatiota tulisi lisäksi tutkia myös maasto-olosuhteissa.

Lentotuhkalla kiinteytettyyn saveen pätevät seuraavat huomiot:

- Pienillä lujuustasoilla indeksiominaisuuksien muutos voi olla hyötykäytön kannalta merkittävämpi kuin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muutos.
- Pelkkää lentotuhkaa käytettäessä osa maan ominaisuuksien muutoksista aiheutuu jo savea karkeamman kiintoaineksen määrän kasvusta.
- Tutkitun erittäin pehmeän saven ominaisuudet muuttuivat kiinteytyksen jälkeen selvästi maarakentamiseen paremmin sopiviksi, mutta saven hyötykäytön kannalta ominaisuuksien olisi pitänyt muuttua vielä enemmän.
- Tutkitun saven stabiloituvuutta olisi voitu parantaa edelleen käyttämällä pientä määrää sementtiä lentotuhkan aktivaattorina, jolloin sideainekustannukset olisivat yhä pysyneet pieninä.
- Toisenlainen runkoaine olisi silti voinut lujittua riittävästi pelkällä lentotuhkalla.

Kaikki määritykset tehtiin laboratorio-olosuhteissa koekappaleille, jotka on valmistettu, säilytetty sekä koestettu vakioituissa olosuhteissa, eikä niitä voida suoraan yleistää maasto-olosuhteisiin. Samat reaktiomekanismit ja -tuotteet lujittavat ja muuttavat stabiloitavan maan ominaisuuksia myös työmaalla. Maan lujittumiseen vaikuttaa maasto-olosuhteissa kuitenkin monia tekijöitä, joita ei voida tai joita on vaikea simuloida laboratoriossa. Tämän vuoksi nykyisten stabiloituvuustutkimusten tueksi tarvittaisiin tietoa laboratoriossa ja maastossa saavutettavien luokitus- ja geoteknisen ominaisuuksien korrelaatiosta.

LÄHTEET

Ali, F. H., Hashim, R., Wong, L. S. 2010. Engineering properties of improved fibrous peat. *Scientific Research and Essay*. Vol. 5 (2), pp. 154-169.

ALLU Finland Oy. 2007. Mass stabilisation manual. (verkkojulkaisu) 57 p. Saatavissa (Viitattu 1.9.2015): <http://www.allu.net/products/stabilisation-system>

ALLU Finland Oy. 2013. ALLU Stabilisation system. (verkkojulkaisu) Saatavissa (Viitattu 1.9.2015): <http://www.allu.net/products/stabilisation-system>

Brandl, H. 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Proceeding of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm. Vol 3, pp. 587-594.

Brandl H. 1999. Long-term behaviour of soils stabilized with lime and with cement. *Geotechnics for Developing Africa*. Wardle, Blight & Fourie (eds.). Rotterdam. Balkema. pp. 219-232.

Broms, B. B. 1986. Stabilization of soft clay with lime and cement columns in South-east Asia. Singapore. Applied research project RP 10/83. Nanyang Technical institute.

Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., Lee & F. H. 2004. Physicochemical and Engineering Behaviour of Cement Treated Clays. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*. Vol. 130 (7), pp. 696-706.

Eades, J. L. & Grim, R. E. 1960. Reactions of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Bulletin* No. 262, pp. 51 – 63.

Eslinger, E. & Pevear, D. 1988. *Clay Minerals for Petroleum Geologists and Engineers*. SEPM Short Course Notes no. 22. 428 p.

Esrig, M. I., 1999. Keynote Lecture: Properties of Binders and Stabilized Soil. *Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilisation*. Brendenberg, Holm, and Broms (eds.). Rotterdam. Balkema. pp. 67-72.

EuroSoilStab. 2002. Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. *Design Guide Soft Soil Stabilisation*. CT97-0351. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III). Project No. BE 96-3177. European Commission. 94 p. Saatavissa (viitattu 18.8.2015): <http://spsi-sro.ru/files/stab.pdf>

Forsman, J., Jyrävä, H., Lahtinen, P., Niemelin, T. & Hyvönen, I. Massastabilointikäsi-
kirja. 2014. 62 s. Saatavissa (Viitattu 12.9.2015):
[http://www.uuma2.fi/sites/default/files/Massastabilointik%C3%A4sikirja%20YLEISVE
RSIO%20-%202014_06_24.pdf](http://www.uuma2.fi/sites/default/files/Massastabilointik%C3%A4sikirja%20YLEISVE%20-%202014_06_24.pdf)

Hakari, M. & Dettenborn, T. 2011. Perkkaan koira-aitaus. Geotekninen laskentaraaportti.
Ramboll Finland Oy.

Hartikainen, H. 1992. Maaperä. Teoksessa Heinonen, R. Maa, viljely ja ympäristö.
Helsinki. Werner Söderström Osakeyhtiö. s. 9-89.

Hassan, M. M., Lojander, M. & Ravaska, O. 2008. Characteristics of soft clay stabilized
for construction purposes. In: Ellis, Yu, McDowell, Dawson & Thom (eds). Advances
in Transportation Geotechnics. London. Taylor & Francis Group. pp. 651-656.

Hassan, M. M. & Ravaska, O. 2009. Strength and permeability characteristics of cement
stabilized Finnish clay. In: Karstunen & Leoni (eds). Geotechnics of Soft Soils - Focus
on Ground Improvement. London. Taylor & Francis Group. pp. 227-233.

Hebib, S. & Farrell, E. R. 2003. Some experiences on the stabilization of Irish peats.
Canadian Geotechnical Journal. Vol. 40, pp. 107-120.

Janz, M. & Johansson, S-E. 2002. The Function of Different Binding Agents in Deep
Stabilization. Linköping. Swedish Deep Stabilization Research Centre. Report 9, 47 p.
Saatavissa (viitattu 14.7.2015): <http://www.swedgeo.se/sd/pdf/SD-R9E.pdf>.

Jyrävä, H. (2015). Diplomi-insinööri, projektipäällikkö, Ramboll Finland Oy, Luopioi-
nen. Keskustelu 14.10.2015

Kauranne, L. K., Gardemeister, R., Korpela, K. & Mälkki, E. 1972. Rakennusgeologia
II. Toinen korjattu painos. Espoo. Otakustantamo. 530 s.

Kezdi, A. 1979. Stabilized Earth Roads. Developments in Geotechnical Engineering.
Amsterdam. Elsevier. Vol. 19.

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N.,
Lahtinen, P. & Forsman, J. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. Energiantuotannon tuh-
kat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Luopioinen. 65 s. + liitt. 18 s. Saatavissa (Viitattu
20.8.2015): http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Kitazume, M. & Terashi, M. 2013. The Deep Mixing Method. Leiden. CRC Press /
Balkema. 410 p.

Kuusipuro, K. Kalkki ja maastabilointi. Nordkalk Oyj Abp. Esitysmateriaali (verkkopublication).

Leivo, A. 2009. Pienillä sementtimäärillä stabiloidun saven vedenläpäisevyys ja työstettävyys. Espoo. Teknillinen korkeakoulu. 114 s. + liitt. 22 s.

Liikennevirasto. 2010. Syvästabiloinnin suunnitteluohje. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. 57 s. + liitt. 12 s.

Lindberg, A. 1983. Mineraalien sorptio-ominaisuuksien geologinen tarkastelu - verkkosilikaatit. Espoo. Geologinen tutkimuslaitos.

Little, D. N. 1995. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Texas Transportation Institute. Texas A&M University. 219 p.

Little, D. N. & Nair, S. 2009. Recommended Practice for Stabilization of Sulfate Rich Subgrade Soils. Texas Transportation Institute. Texas A&M University. College Station, Texas. Saatavissa (Viitattu 1.11.2015): http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w145.pdf

Locat, J., Tremblay, H. & Leroueil, S. 1996. Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 33, No. 4, pp. 654-669.

Lojander, M. 1985. RIL 157-1 Geomekaniikka 1, osa 3. Geomekaaniset ominaisuudet. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto.

Lorenzo, G. A. & Bergado, D. T. 2006. Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in deep mixing. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. Vol 18, No 2, pp 161-174.

Munro, R., Sigursteinsson, H., Carlsten, P., Zweifel, G. & Pyhähuhta, M. Roadex E-learning, kurssi 2. Turpeen päälle rakennetut tiet. Saatavissa (viitattu 8.9.2015): <http://www.roadex.org/index.php/e-learning/preface-peat-fi>

Müller-Vonmoos, M. 1983. Die Bedeutung der Tonminerale für das bodenmechanische Verhalten. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik. Studientag, 4. Nov. 1983, Fribourg.

Mälkki, M. 1998. Geologia, geokemia ja mineralogia: Yleiset perusteet ja merigeologiset sovellutukset (erityisesti Itämeren alueella). Kirjallisuusselvitys. MERI - Report se-

ries of the Finnish Institute of Marine Research No 34. Saatavissa (Viitattu 20.10.2015): <http://www.baltic.vtt.fi/pdfs/meri34.pdf>

Rajasekaran, G. & Rao, S. N. 2002. Permeability characteristics of lime treated marine clay. *Ocean Engineering*. Vol 29, pp. 113-127.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 2004. *Geotekniikka*, 20. painos. Helsinki. Otatieto. 307 s.

Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristö 2/2012. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. (Verkkojulkaisu). Saatavissa (Viitattu 3.11.2015): https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

Skels, P., Bondaris, K. & Korjaks, A.. 2013. Unconfined Compressive Strength Properties of Cement Stabilized Peat. Civil Engineering '13 : 4th International Scientific Conference : Proceedings. Latvia, Jelgava. Saatavissa (viitattu 1.10.2015): http://llufb.llu.lv/conference/Civil_engineering/2013/partI/Latvia_CivilEngineering2013Vol4PartI_202-206.pdf

Sridharan, A. 2002. Engineering behaviour of clays: Influence of mineralogy. In: Hueckl & Loret (eds.). *Chemo-Mechanical Coupling in Clays: from Nano-scale to Engineering Applications*. Lisse. Swets & Zeitlinger. pp. 3 - 28.

Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry. 2012. ISO-maaluokituksen soveltamisohje Suomessa. SFS-EN ISO 14688. 21 s. + liitt. 4 s.

Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry. 1985. GLO-85. Geotekniset laboratorio-ohjeet 1. Luokituskokeet. Helsinki. Rakentajain Kustannus Oy. 107 s.

Thompson, R. M. 1967. Factors influencing the plasticity and strength of lime-soil mixtures. *University of Illinois Bulletin*. Vol. 64 (100). Saatavissa (viitattu 3.8.2015): <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/4329/engineeringexperv00000i00492.pdf?sequence=3>.

Tiehallinto. 2007. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki. Saatavissa (Viitattu 19.8.2015): <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>

Tie- ja vesirakennushallitus. 1986. Kuivakuorisavien ja silttien käyttö tiepenkereissä.. Saatavissa (Viitattu 10.11.2015): http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/723855-v-kuivakuorisavien_kaytto_tiepenkereissa.pdf

Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J. & Leroueil, S. 2002. Influence of the nature of the compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 39, No. 4, pp. 535-546.

Åhnberg, H., Johansson, S. E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. & Holm, G. 1995. Cement och kalk för djupstabilisering av jord: En kemisk - fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Linköping. Statens geotekniska institut. Report 48. Saatavissa (viitattu 15.7.2015): <http://www.swedgeo.se/upload/publikationer/Rapporter/pdf/SGI-R48.pdf>

Åhnberg, H., Begtsson, P-E & Holm, G. 2000. Laboratory tests of mixtures – Test sites Dömle Mosse and Holma Mosse, Sweden. National report, part 1. Internal report. EuroSoilStab project.

Åhnberg, H. 2006 Strength of Stabilised soils - A laboratory report on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Doctoral thesis. Lund University. 80 p. + papers I-VII. Saatavissa (viitattu 10.6.2015): <http://www.swedgeo.se/upload/publikationer/Rapporter/pdf/SGI-R72.pdf>

LIITE 1: Koekappalenumerot ja laboratoriotulokset, pohjanvahvistustutkimusohjelma

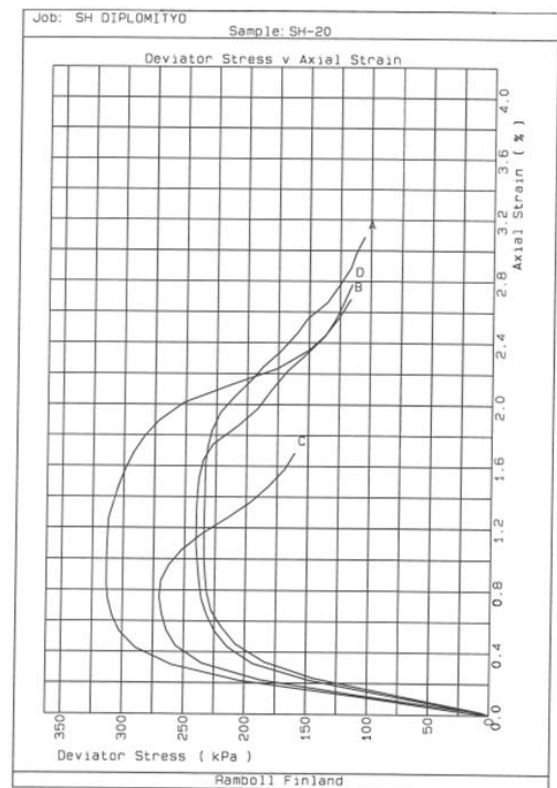
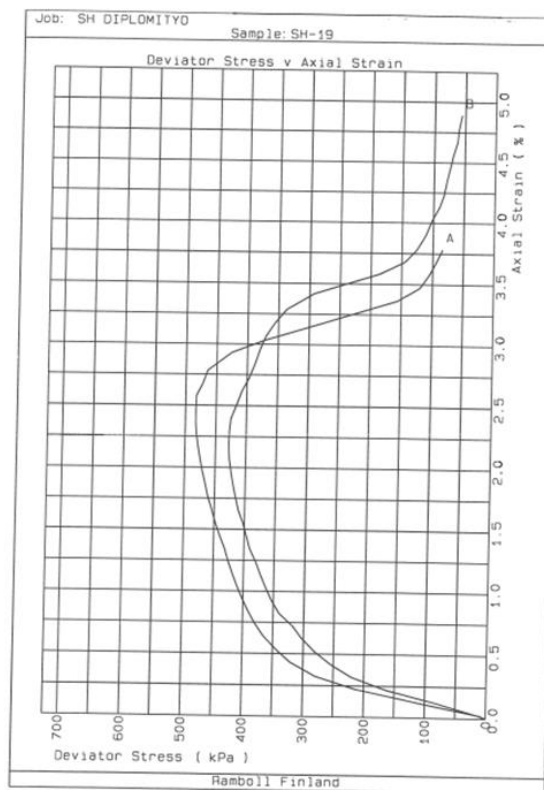
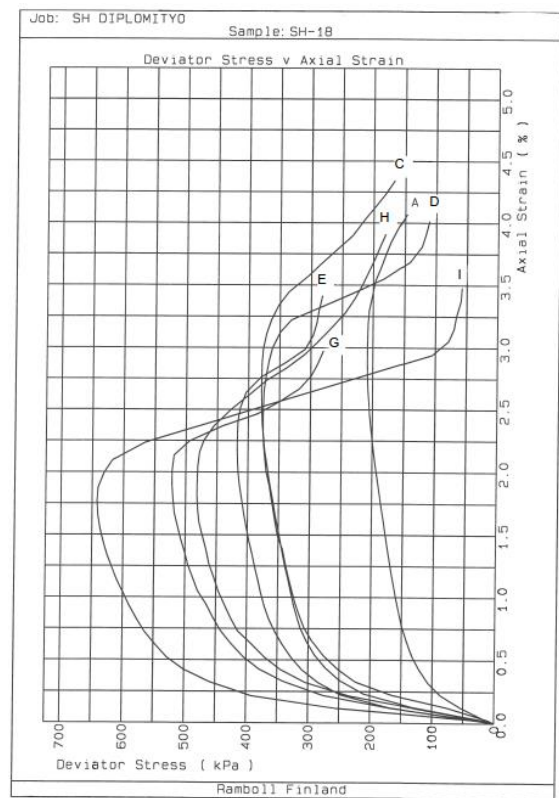
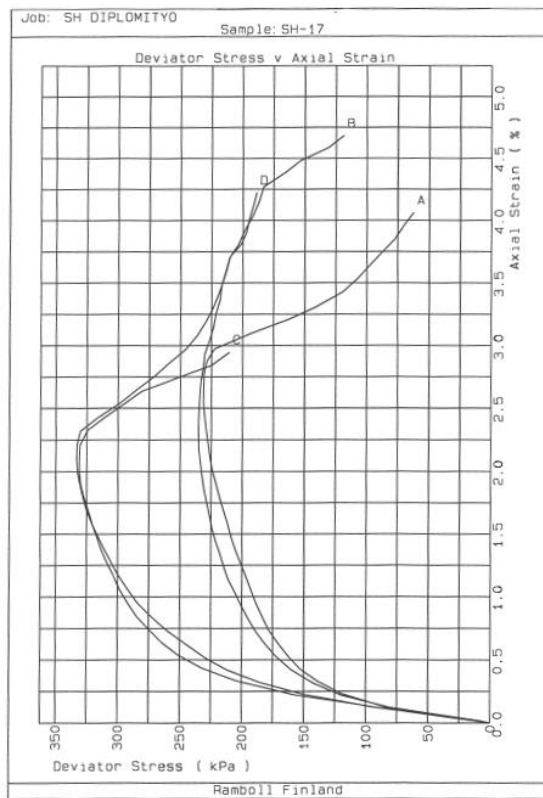
Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m ³]	Koekappalenumerointi					Puristuslujuus [kPa]					Kimmomoduuli [MPa]					Kärkivastus (penetrometri) [kPa]					Vedenläpäisyvyys [m/s]		
			7 d	28 d	60 d	90 d	180 d	7 d	28 d	60 d	90 d	180 d	7 d	28 d	60 d	90 d	180 d	7 d	28 d	60 d	90 d	180 d	28 d	90 d	
Sa / Honkasuo	KC (3:7)	50		SH-17AB			-17CD		233			332			54,3			62,8		2667		3160			
		70	-18A	-18CD	-18E		-18GH	-18I	209	378	418	502	642	33,0	82,6	119	118	194	1813	3795	3780	4340	5120		
		100		-19AB					456						79,8					4500					
	50		-20AB			-20CD		238			292			66,4			91,1		1785		2107				
	GTC	70	-21A	-21CD	-21E		-21GH	-21I	166	370	489	530	656	44,9	86,7	148	147	190	1433	2880	3460	3285	4410		
Sa / Koirapuisto	PlusSe	100		-22AB				430						88,6					3453						
		30		-23AB				110						20,3					935						
		50	-24A	-24CD	-24E		-24GH	-24I	166	264	308	372	492	30,1	67,7	89,5	108	147	1520	1850	2805	3417	4380	5,2E-10	
	70		-25AB				494						119					4080							
	KC (3:7)	70		-26AB			-26EF		157			273			37,8			79,1		1173		1387			
Sa / Kuohijoki	PlusSe + LT	90	-27AB	-27CD			-27EF		136	218		391		26,1	50,5		83,6		1153	1667		2633			
		50	-28AB	-28CD			-28EF		85,7	121		165		13,3	21,9		45,7		733	847		1230		1,2E-09	
		70		-29AB				222						43,4					1547						
	40		-40AB				62,2						9,9					650							
	PlusSe	60	-41A	-41CD	-41EF		-41GH	-41I	229	281	274	292	343	40,8	84,9	79,7	80,7	102	2160	2480	2640	3013	3440	1,4E-09	
Lj / Koirapuisto	GTC	80		-42AB				602						149					4800						
		40 + 75		-43AB				77,0						16,7					770						
		40 + 150	-44A	-44CD	-44EF		-44GH	-44I	95,1	94,4	106	128	182	12,5	22,0	21,5	31,4	64,6	907	1067	1060	1367	2013		
	60 + 75		-45AB				284						88,5					2960							
	40		-46AB				57,7						9,7					567							
Tv / Hämeenlinna	PlusSe	60	-47A	-47CD	-47EF		-47H	-47I	200	270	318	323	376	65,2	84,4	125	80,2	121	1800	2440	2730	2400	2980		
		80		-48AB				662						210					4700						
		60		-49B				91,4						7,3					1213						
	80		-30AB				55,5						2,2					317							
	100	-31A	-31CD			-31EF	-31GH	84,0	104			100	156	5,2	15,8		18,9	27,6	827	993		1120	1747		
Lj / Koirapuisto	PlusSe + LT	130		-32AB				207						44,4					1560						
		80 + 75		-33AB				62,2						2,2					645						
		80 + 150	-34A	-34CD			-34EF		56,3	68,9		83,0		2,7	3,0		5,8		697	810		900			
	130	-37A	-37CD			-37EF		96,0	141		168,9		9	23,3		27,3		967	1300		1733				
	130		-39AB				177							9,2					2120						
Tv / Honkasuo	PlusSe	100	-6A	-6CD			-6GH	-6EF	69,5	73,0		67,5	74,8	3,2	6,3		4,8	6,4	487	655		663	708		
		120	-7A	-7BCD	-7EF		-7GH	-7I	72,2	84,8	92,3	89,3	87,2	5,1	7,9	9,1	7,2	9,4	700	777	650	820	828	7,5E-09	1,6E-08
		140	-8A	-8CD					103	115				8,7	11,6				715	1300					
	100 + 100	-9A	-9BC	-9EF		-9GH	-9I	63,4	57,65	57,6	65,3	57,8	5,9	6,2	5,5	6,7	6,0	645	681	675	657	528			
	100 + 200	-10A	-10CD			-10B		66,9	77,8			70,7	6,8	9,2				6,0	715	785		720			
Tv / Hämeenlinna	PlusSe + LT	120 + 100	-11A	-11CD				80,1	90,7					7,6	9,4				828	870					
		80		-12AB					58,0						5,5				660						
		100	-13A	-13CD			-13EF		90,8	87,6		80,1		6,4	9,0		10,0		715	1030		701			
	130	-14A	-14CD			-14EF	-14B	150			186	174	17,5			24,9	27,1	1447			1255	1700			
	80 + 100	-15A	-15CD			-15B		73,1	79,8			81,5	8,0	9,7				12,1	820	738		800			
100 + 100	-16A	-16CD			-16EF		108	109			86,3		9,4	14,1		12,6		665	871		1097				

Anvio moduulista tehty graafisesti

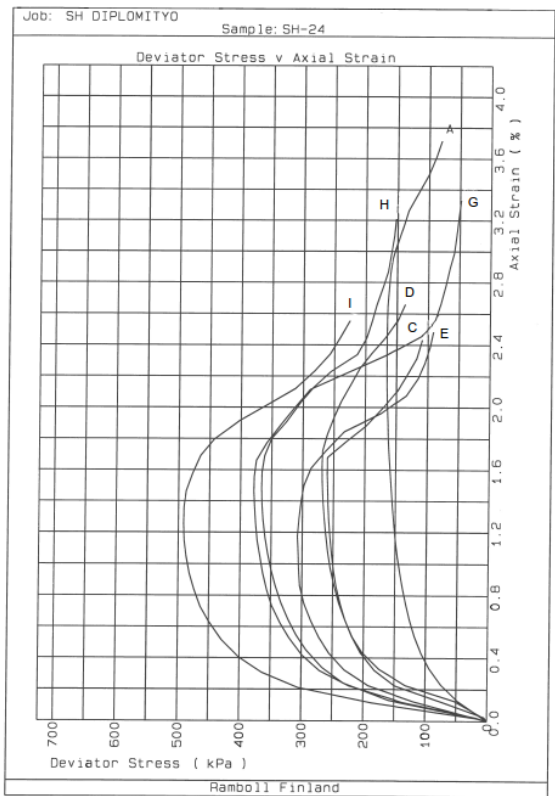
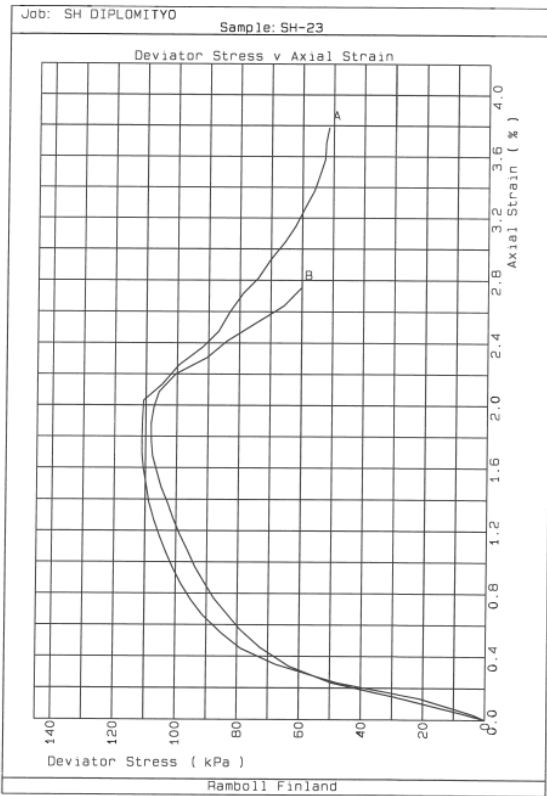
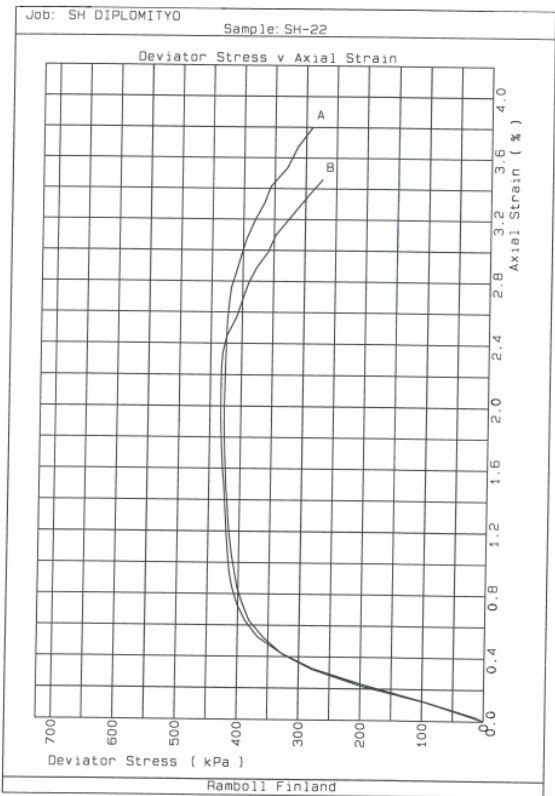
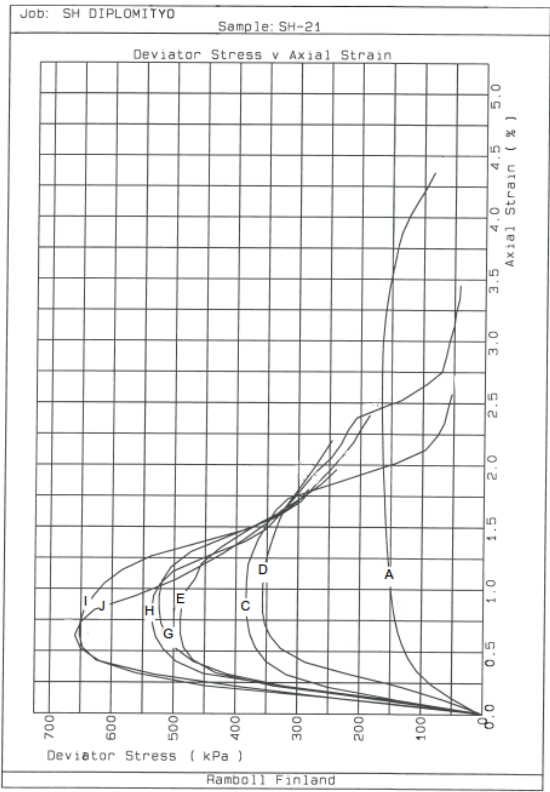
LIITE 2: Koekappalenumerot ja laboratoriotulokset, kiinteytetyn saven tutkimusohjelma

Runkoaine	Sideaine	Määrä [kg/m³]	Nro	Puristuslujuus [kPa]			Vesipitoisuus [%]			Tiiväuspaino [kN/m³]			Kärkivastus [kPa]			Juoksuraja [%]			Kiertysraja [%]			Suljettu leikkauslujuus, "häiriintymätön" [kPa]			Suljettu leikkauslujuus, häiritty [kPa]		
				7 d	28 d		7 d	28 d		7 d	28 d		7 d	28 d		7 d	28 d		7 d	28 d		7 d	28 d		7 d	28 d	
Sa / Koirapuisto	LT	180	SH-61	-	-		79,5	78,8		14,7	15,0		-	-		74,0	76,5		25,5	31,0		2,9	3,89		1,4	1,5	
		230	SH-62	-	-		75,6	75,4		15,0	15,2		-	-		75,7	77,4		28,9	31,4		3,6	5,02		1,9	2,1	
		280	SH-63	3,3	5,5		72,4	70,9		15,3	15,4		-	-		72,8	75,4		32,2	32,7		5,3	6,04		2,5	3,4	

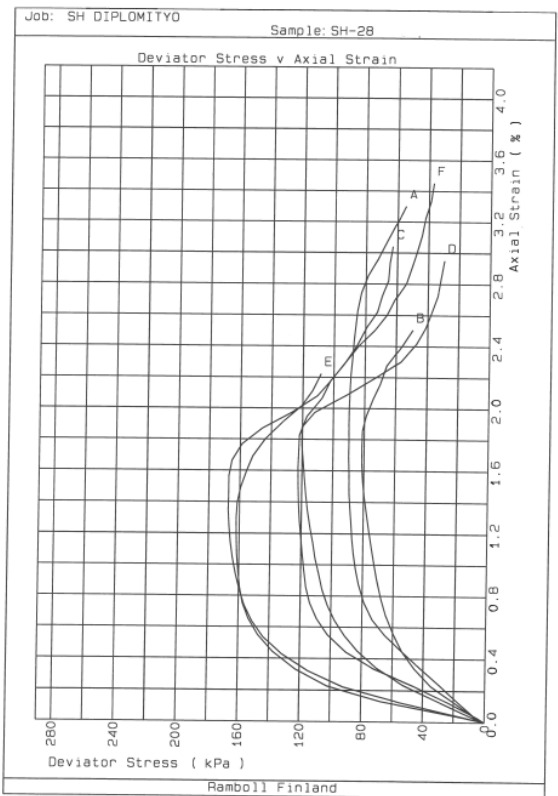
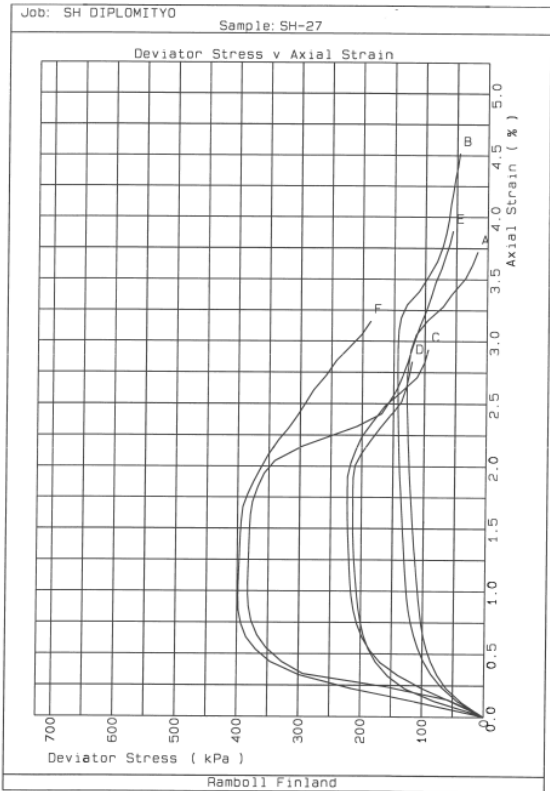
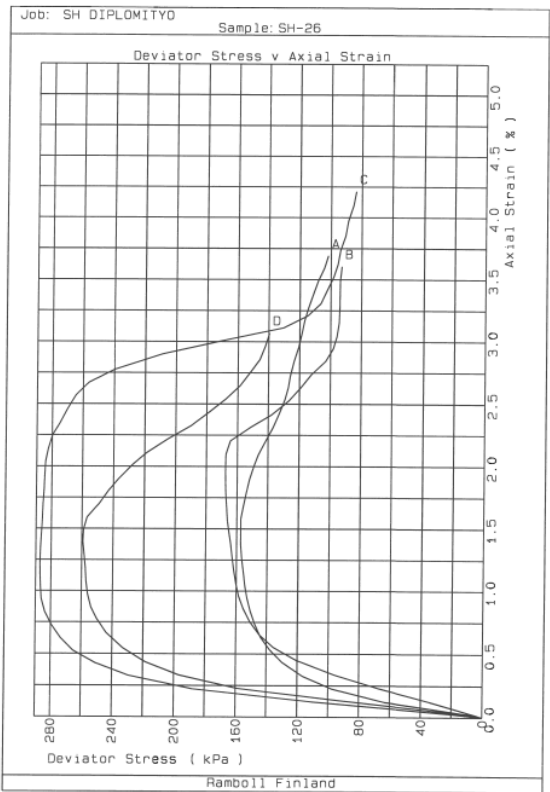
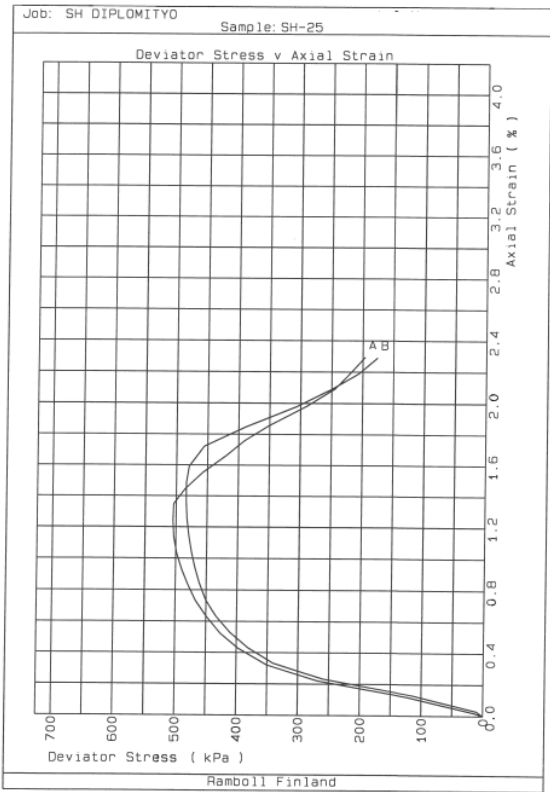
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



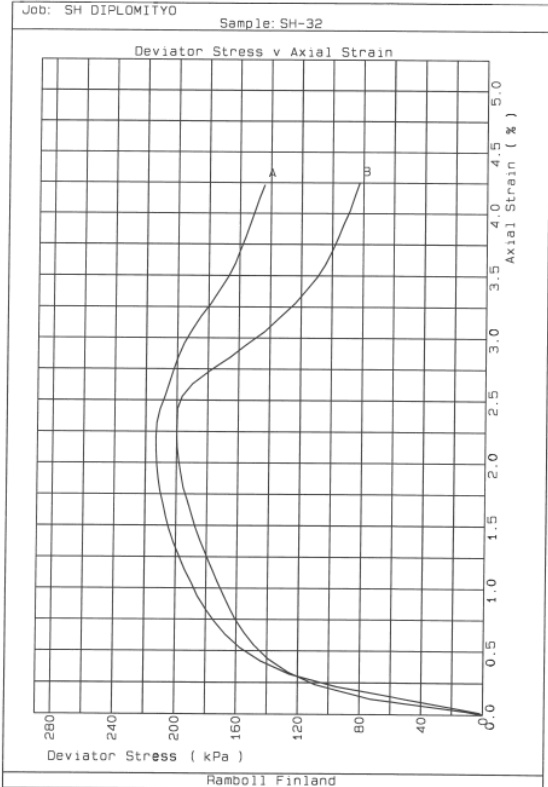
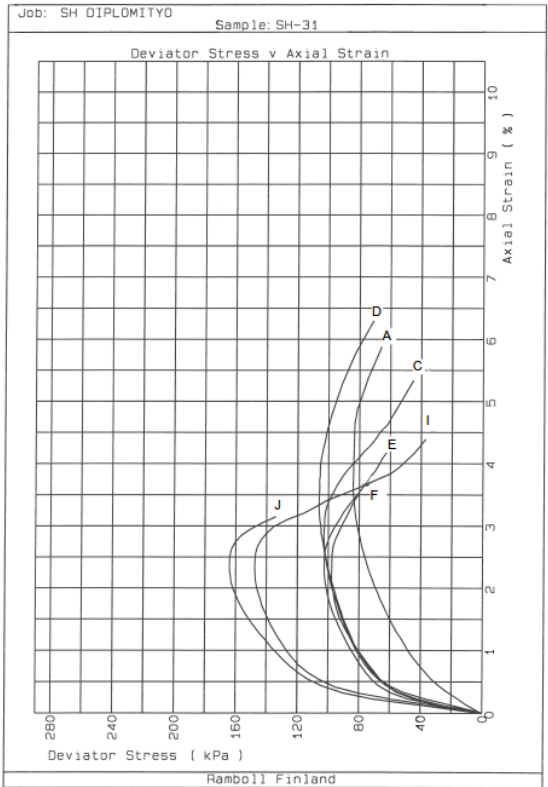
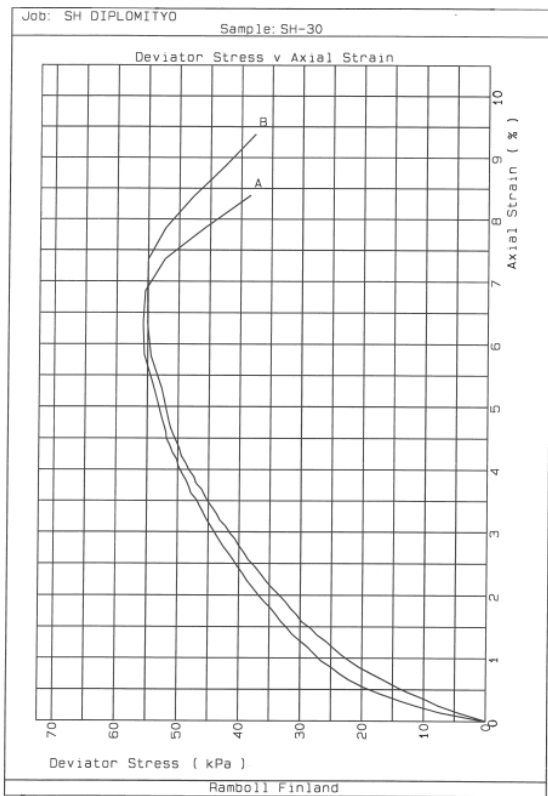
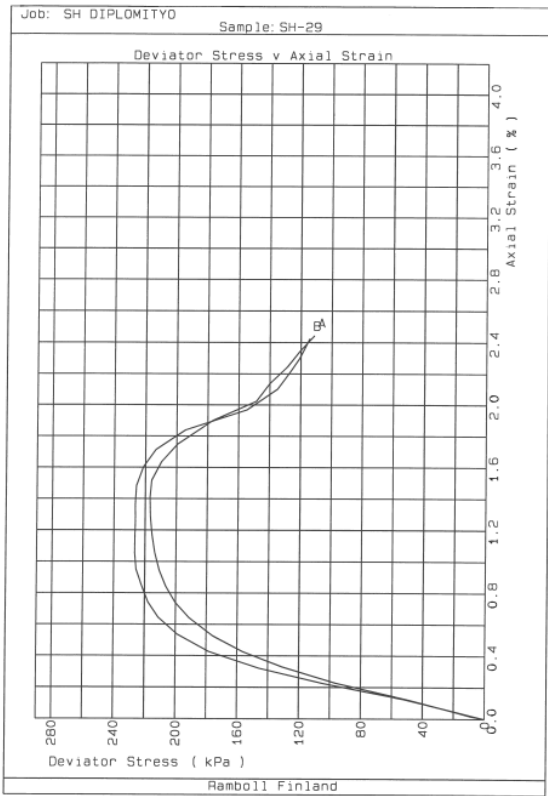
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



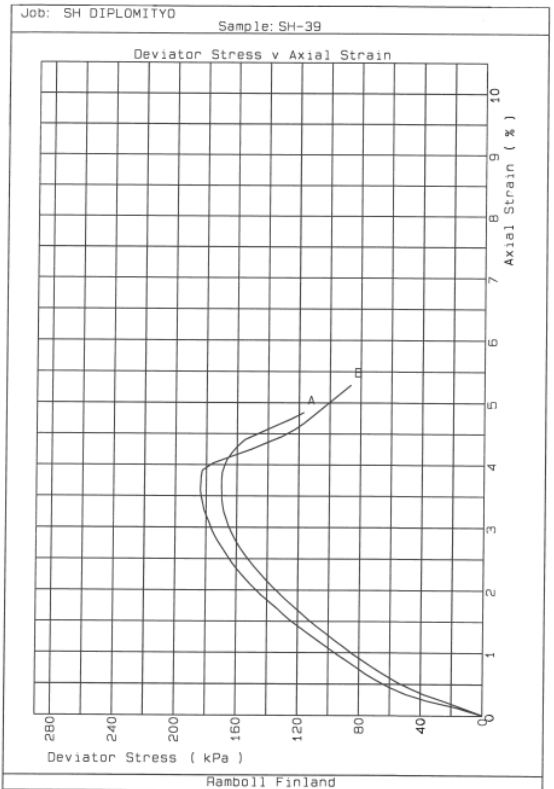
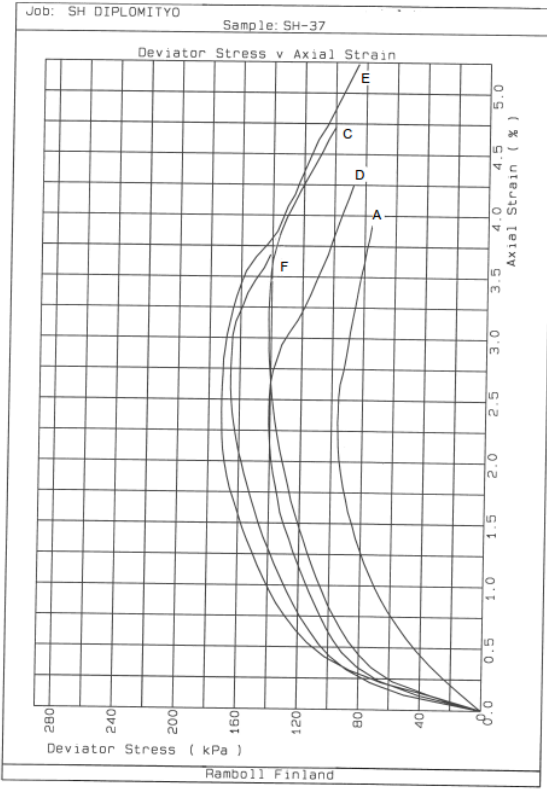
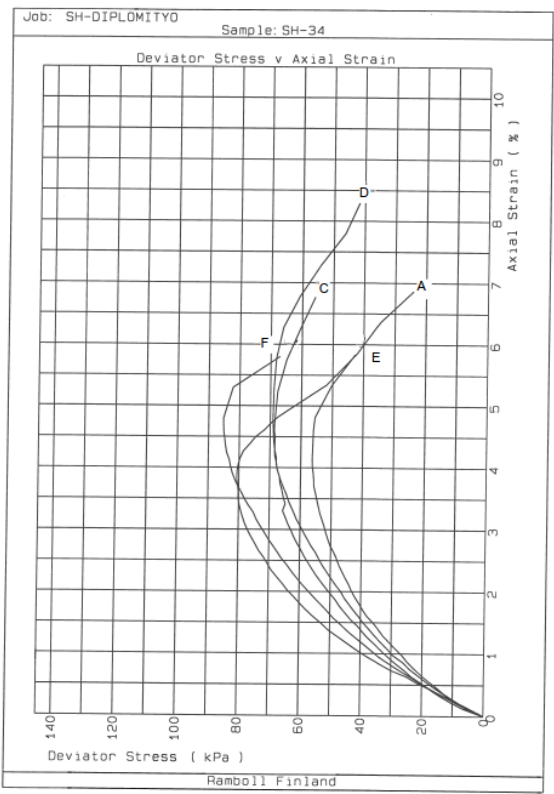
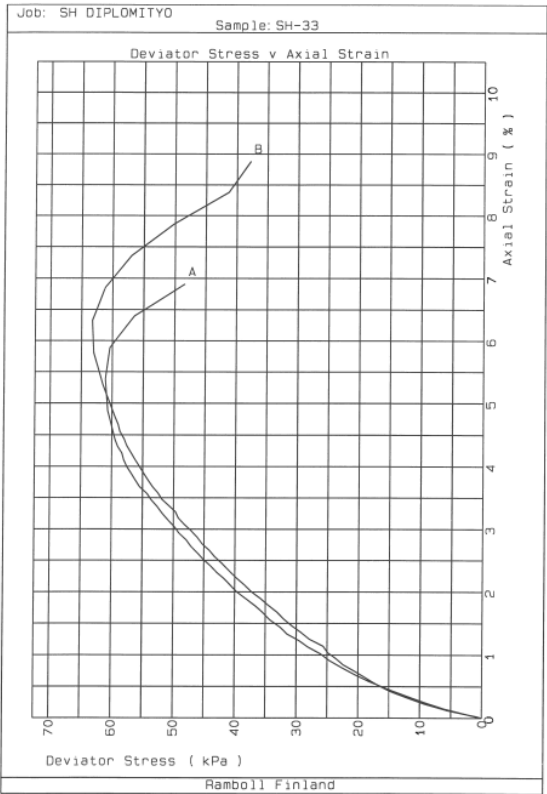
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat

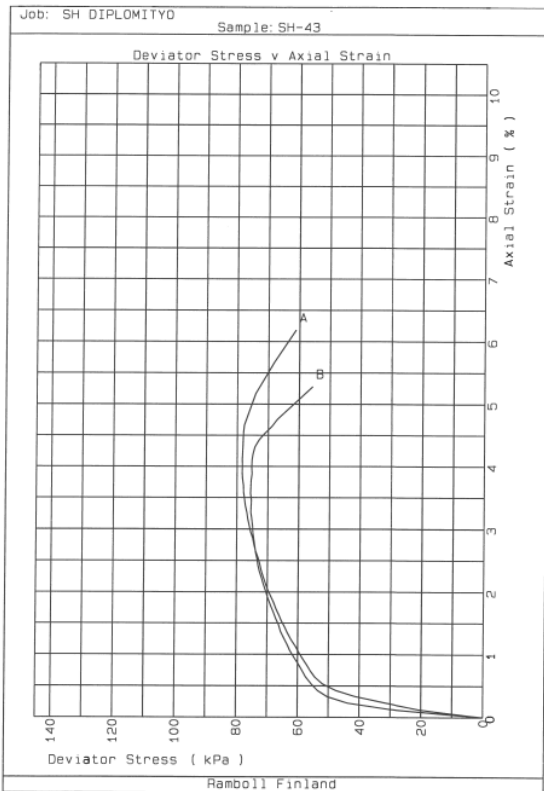
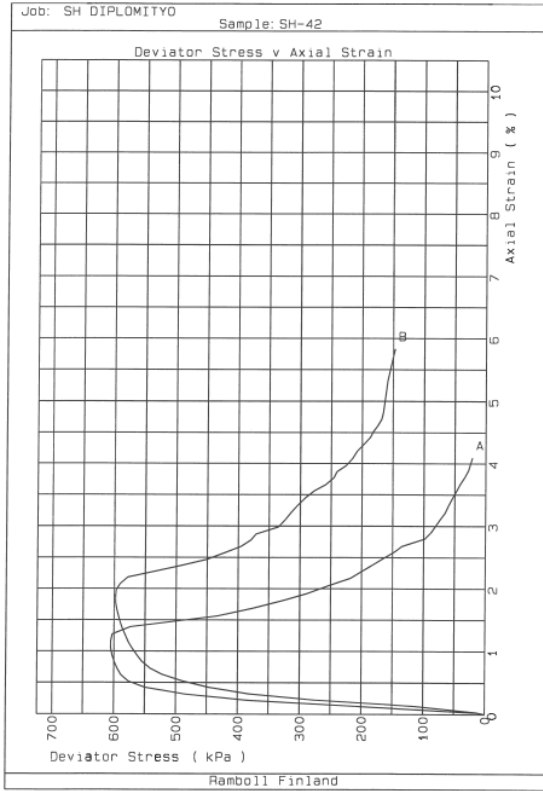
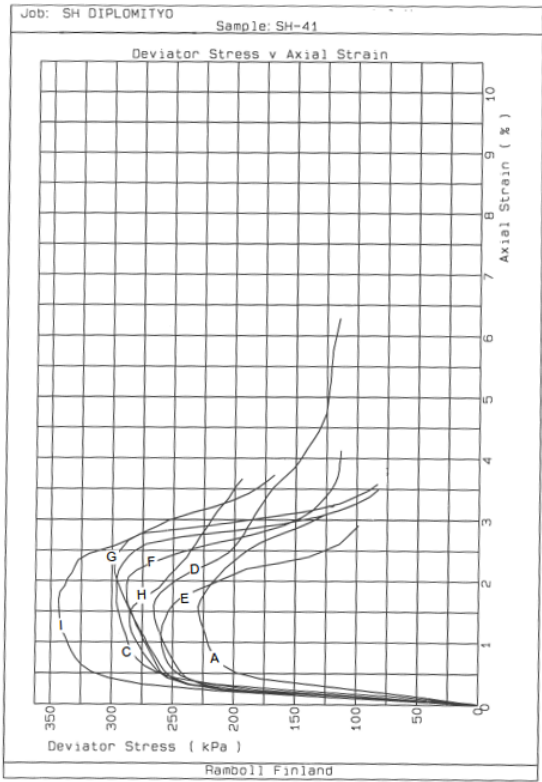
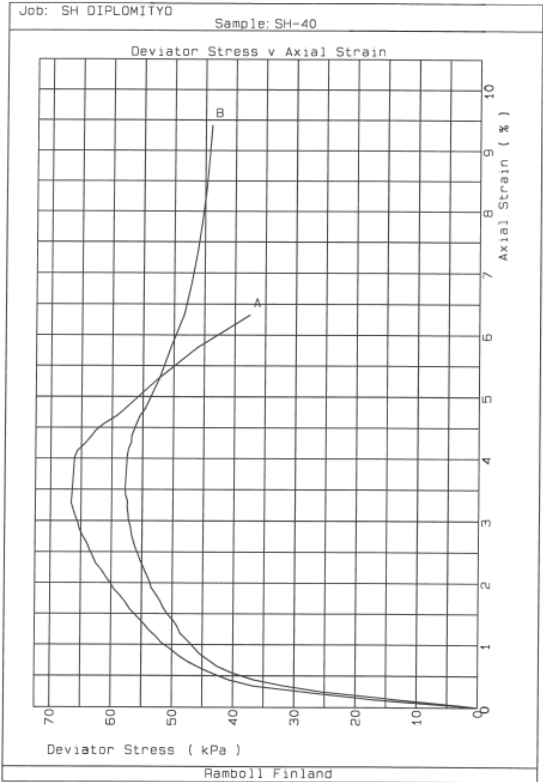


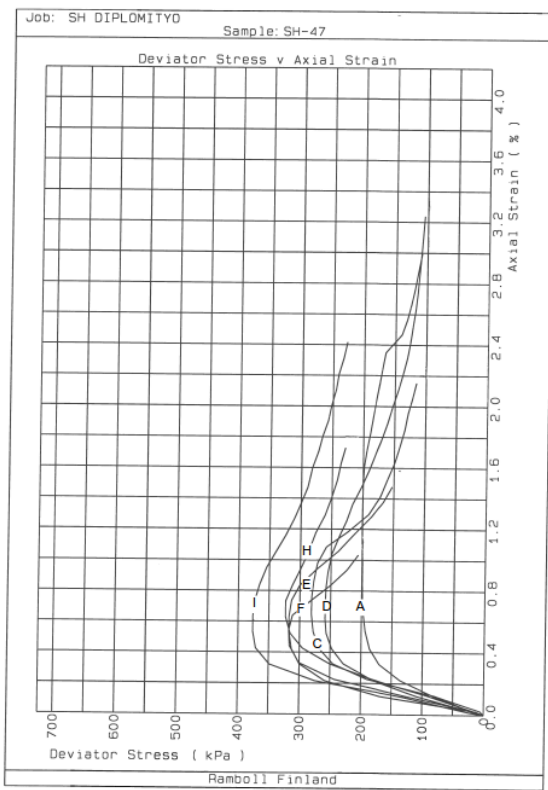
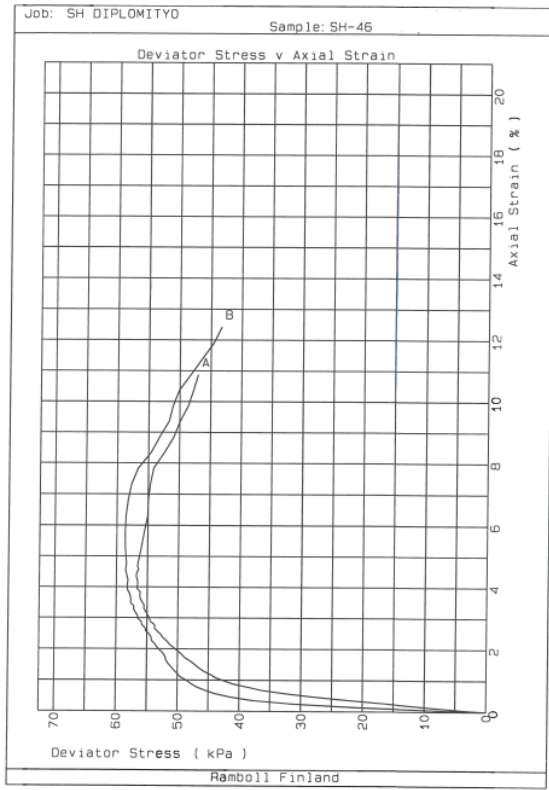
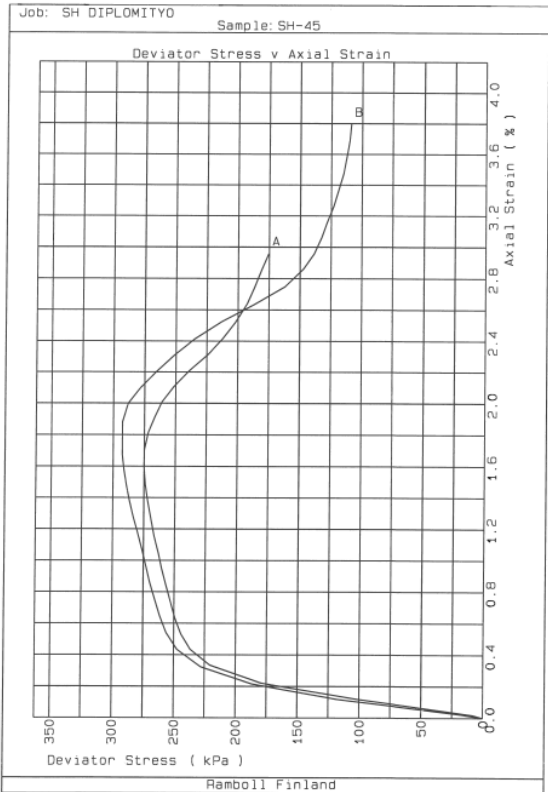
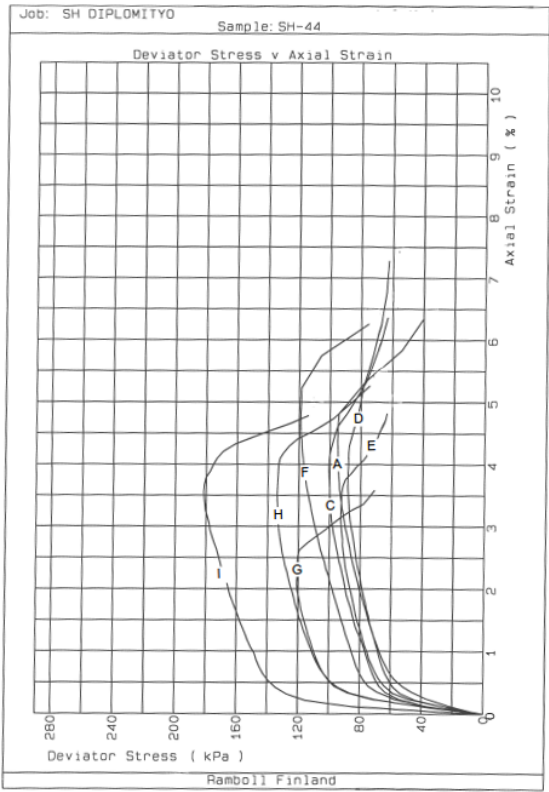
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



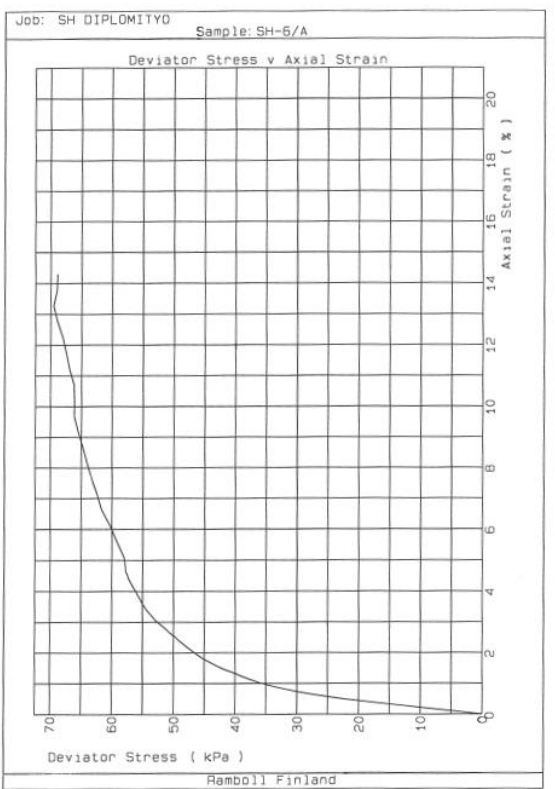
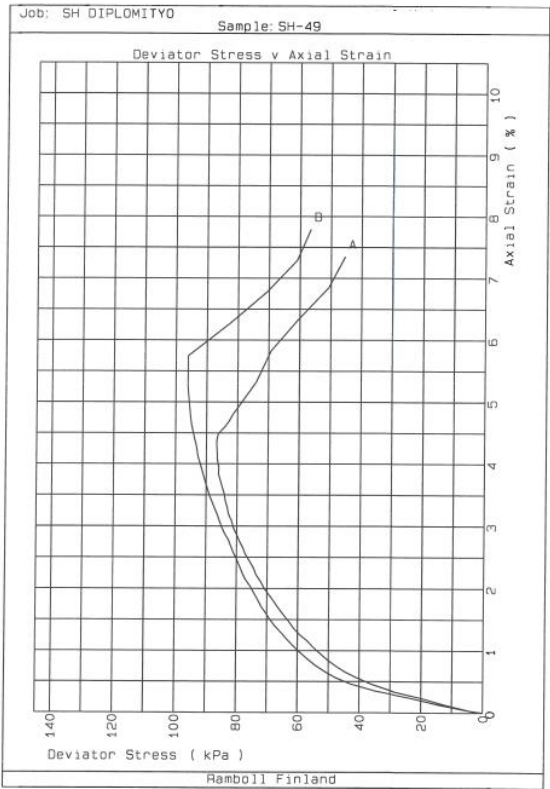
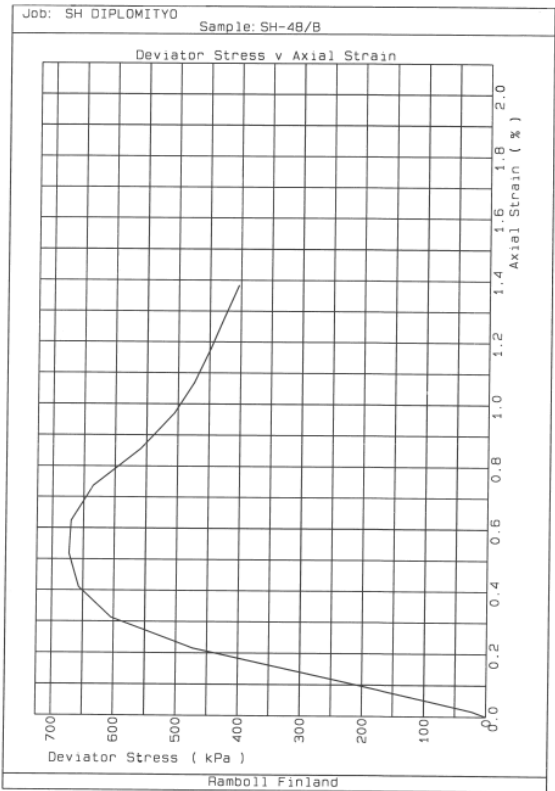
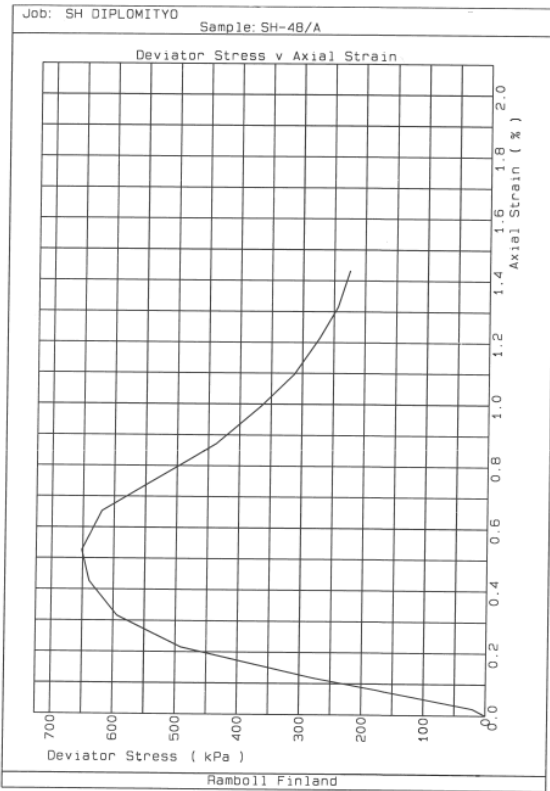
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



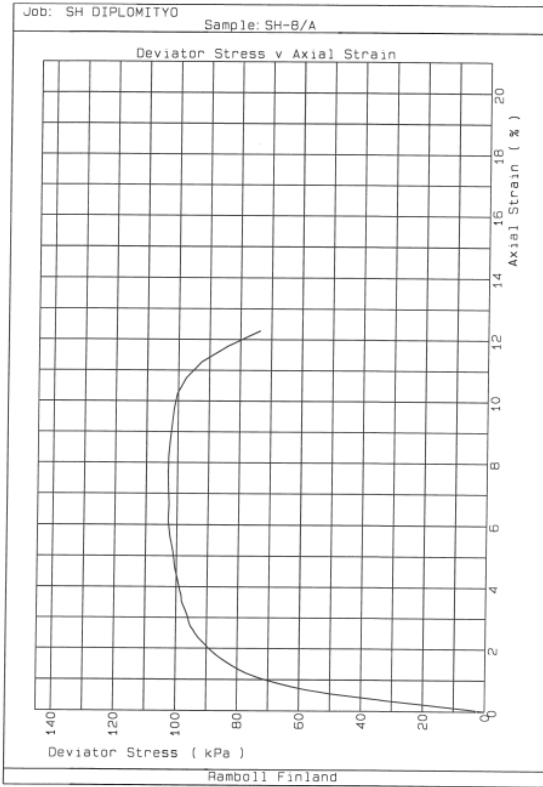
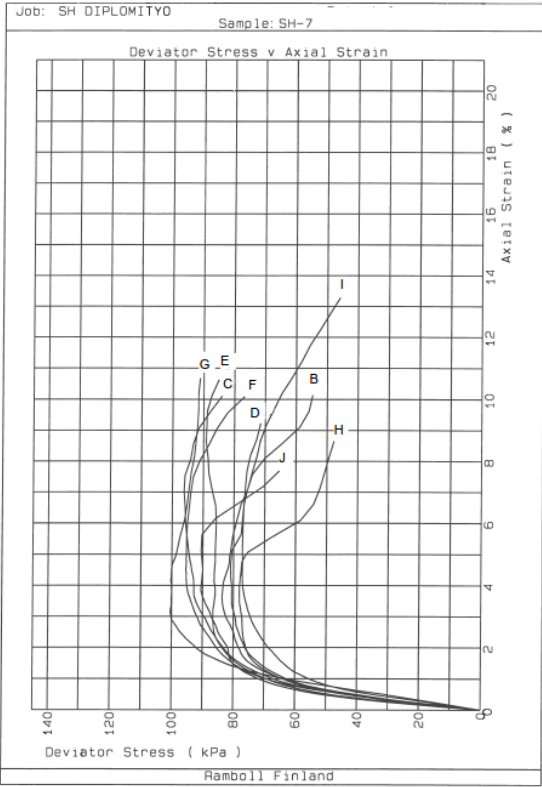
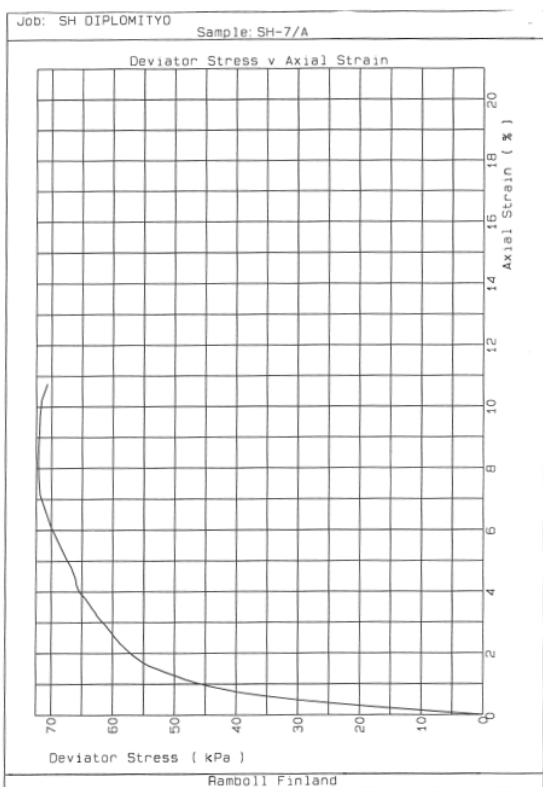
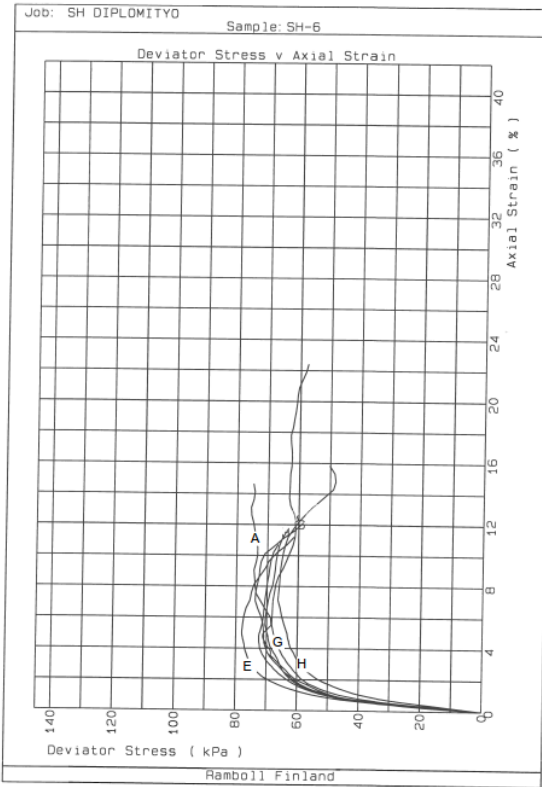




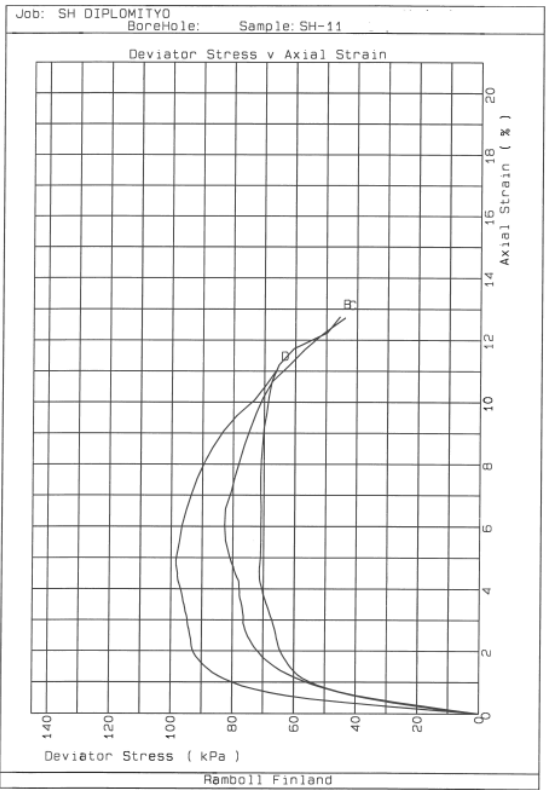
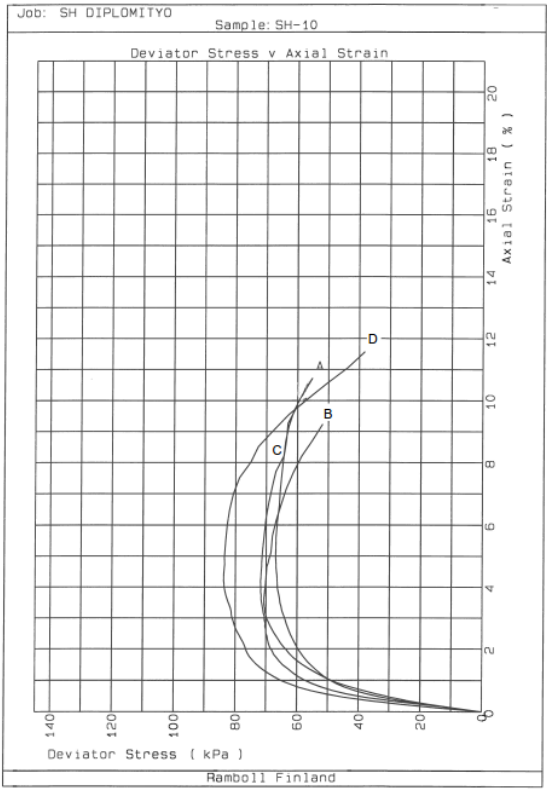
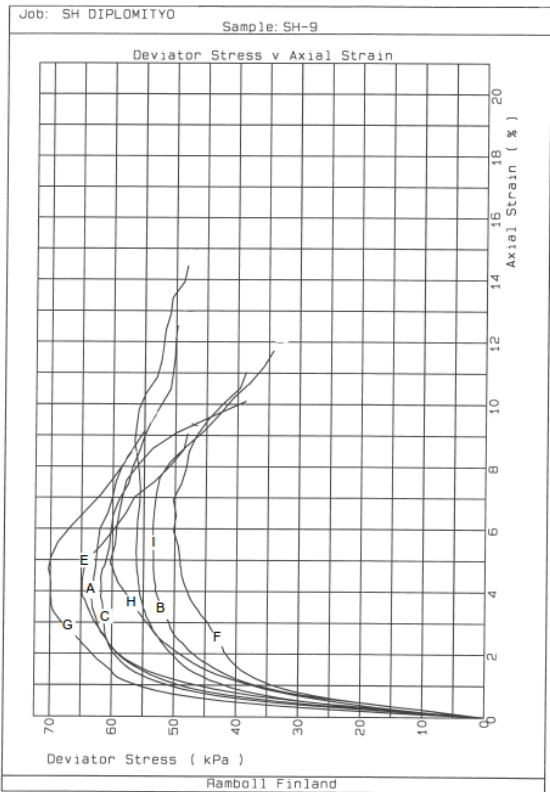
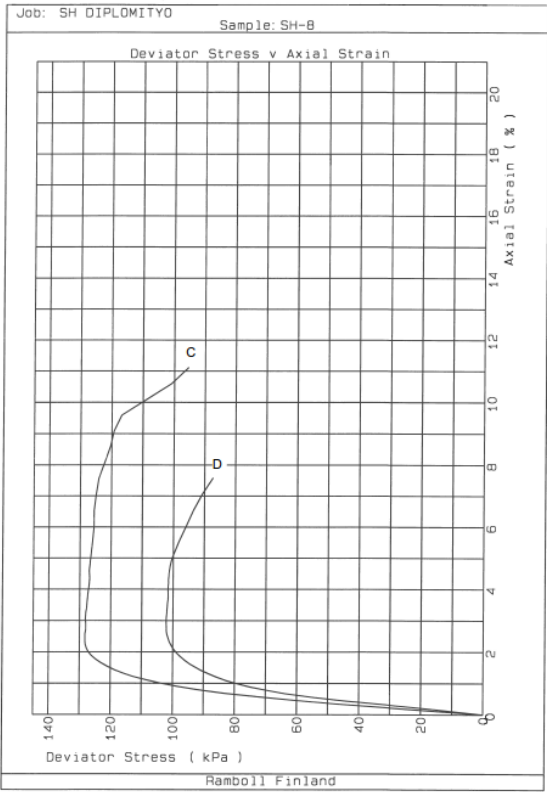
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



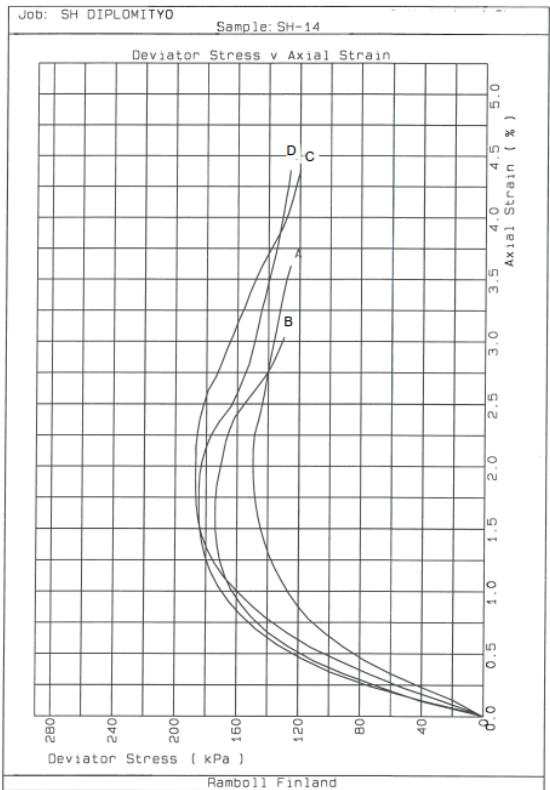
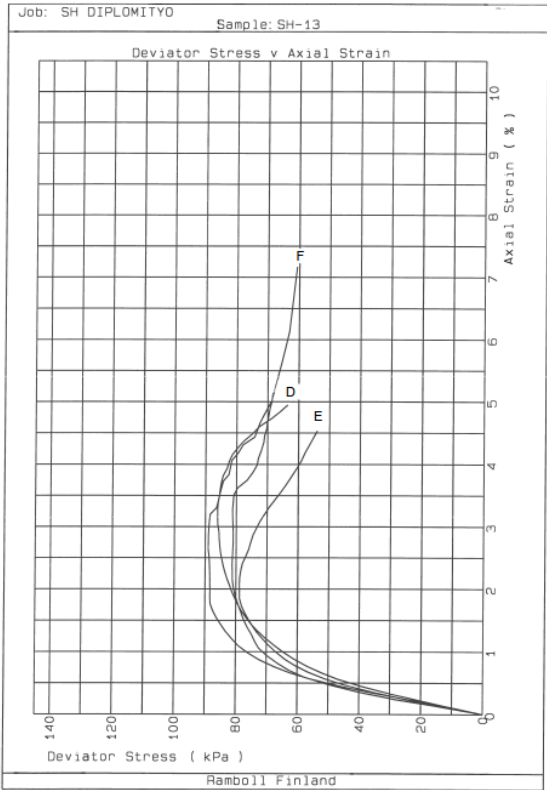
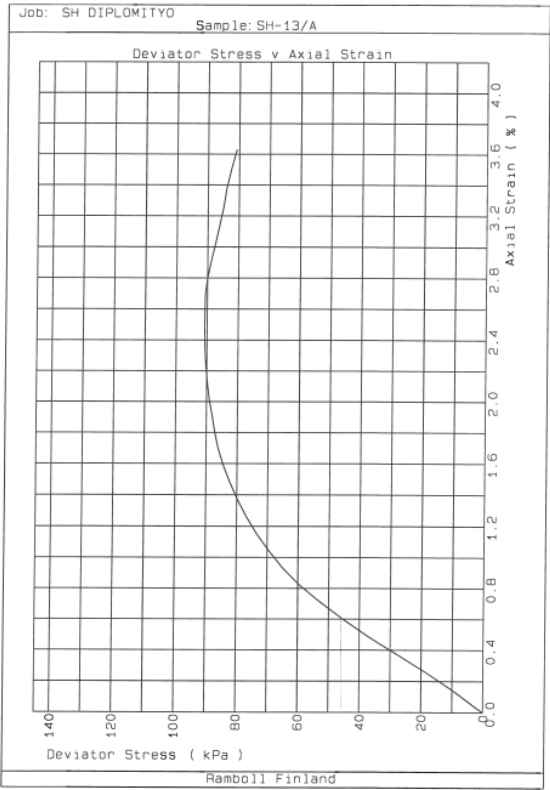
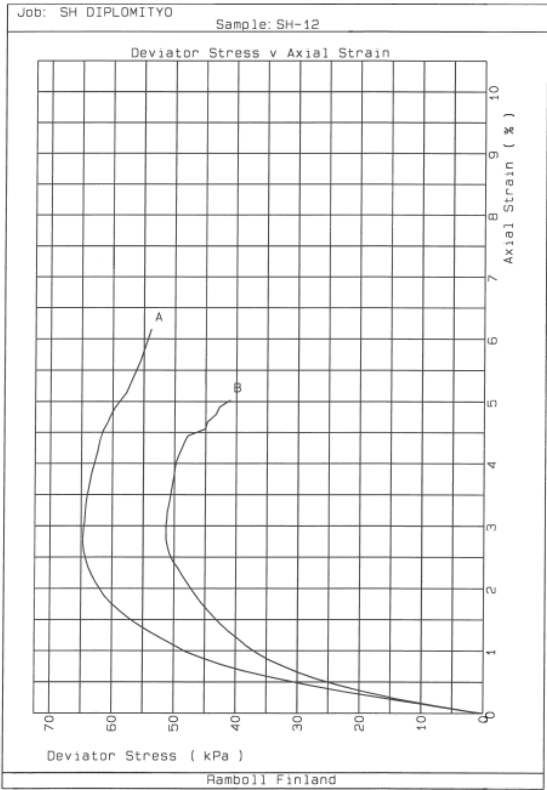
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



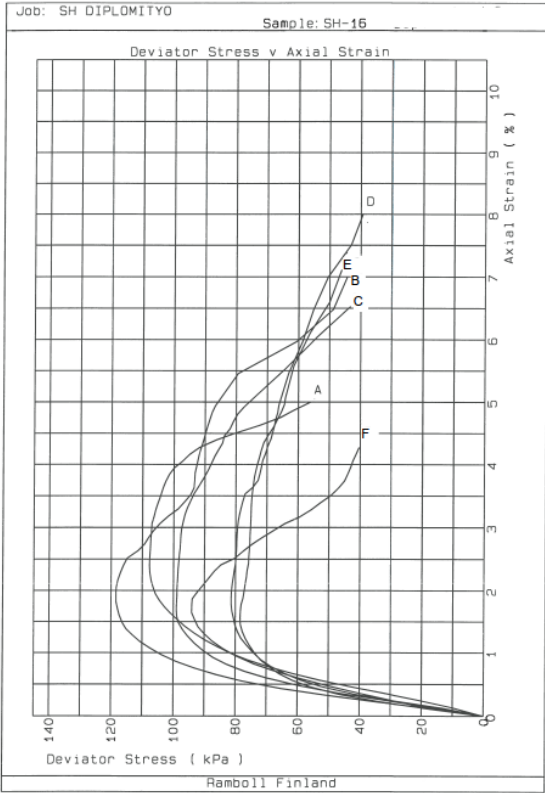
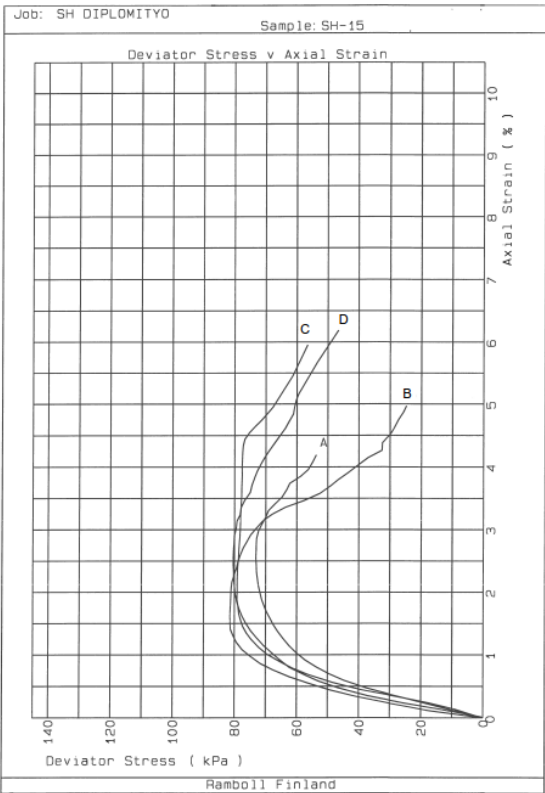
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat



Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat

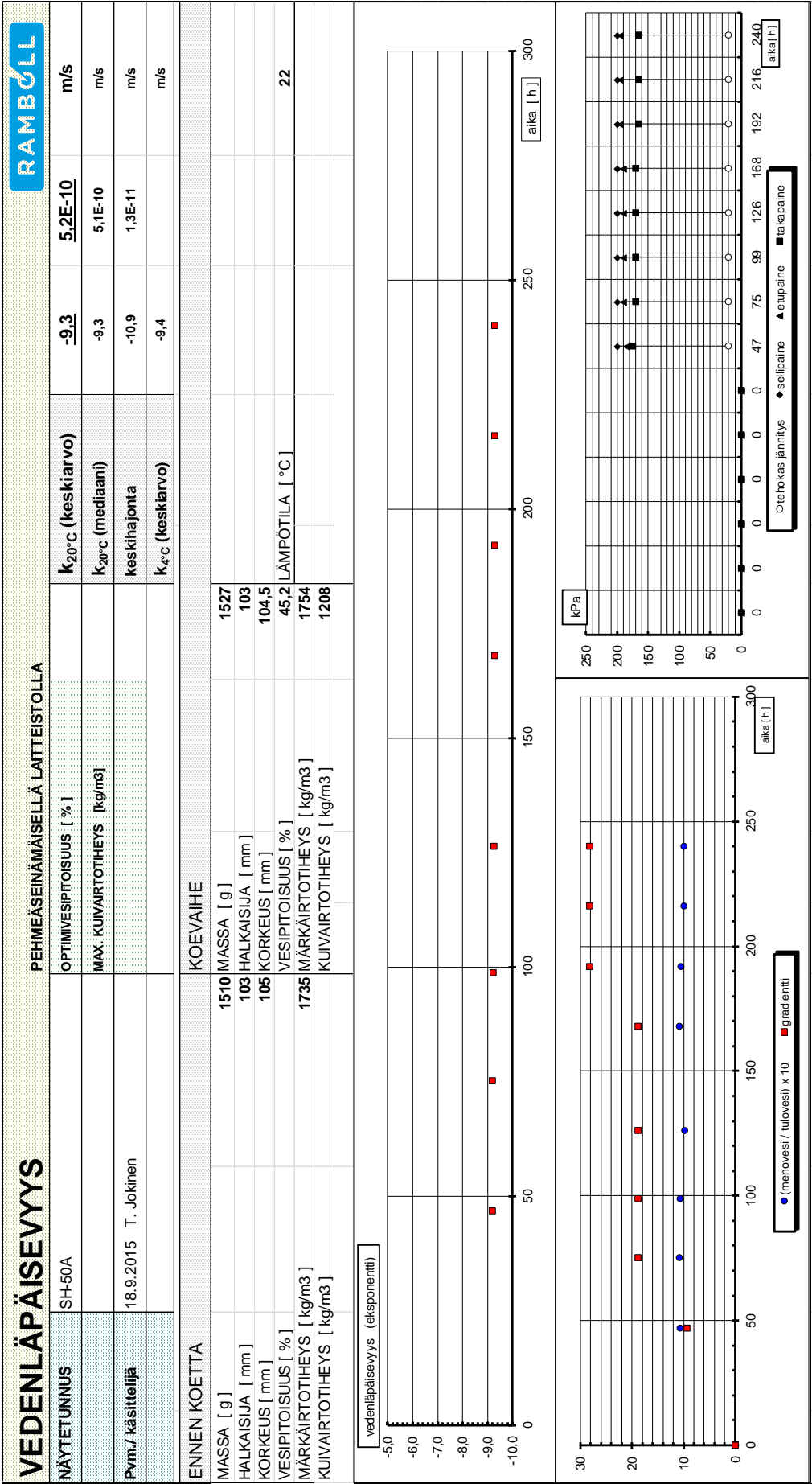


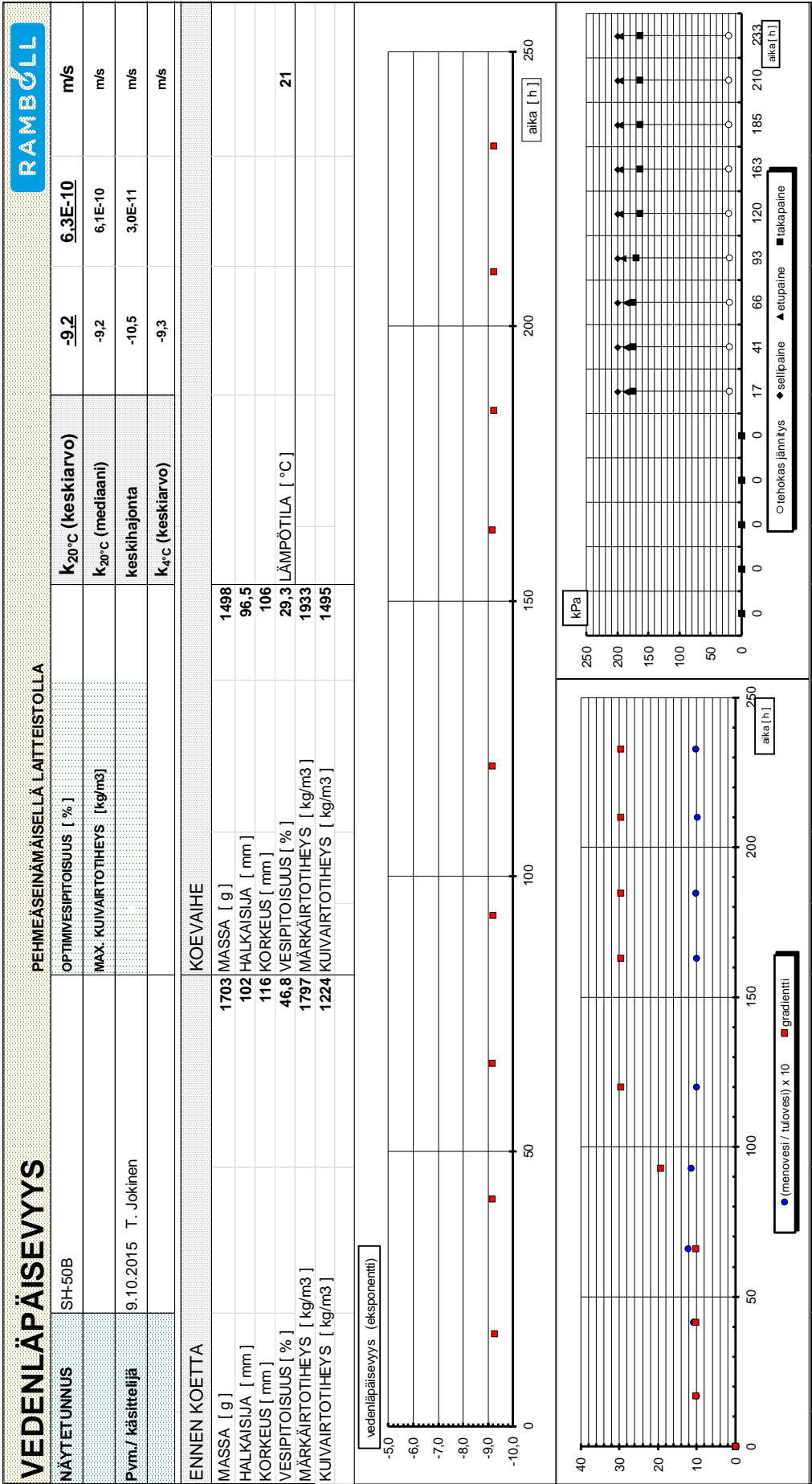
Liite 3: Jännitys-muodonmuutoskuvaajat

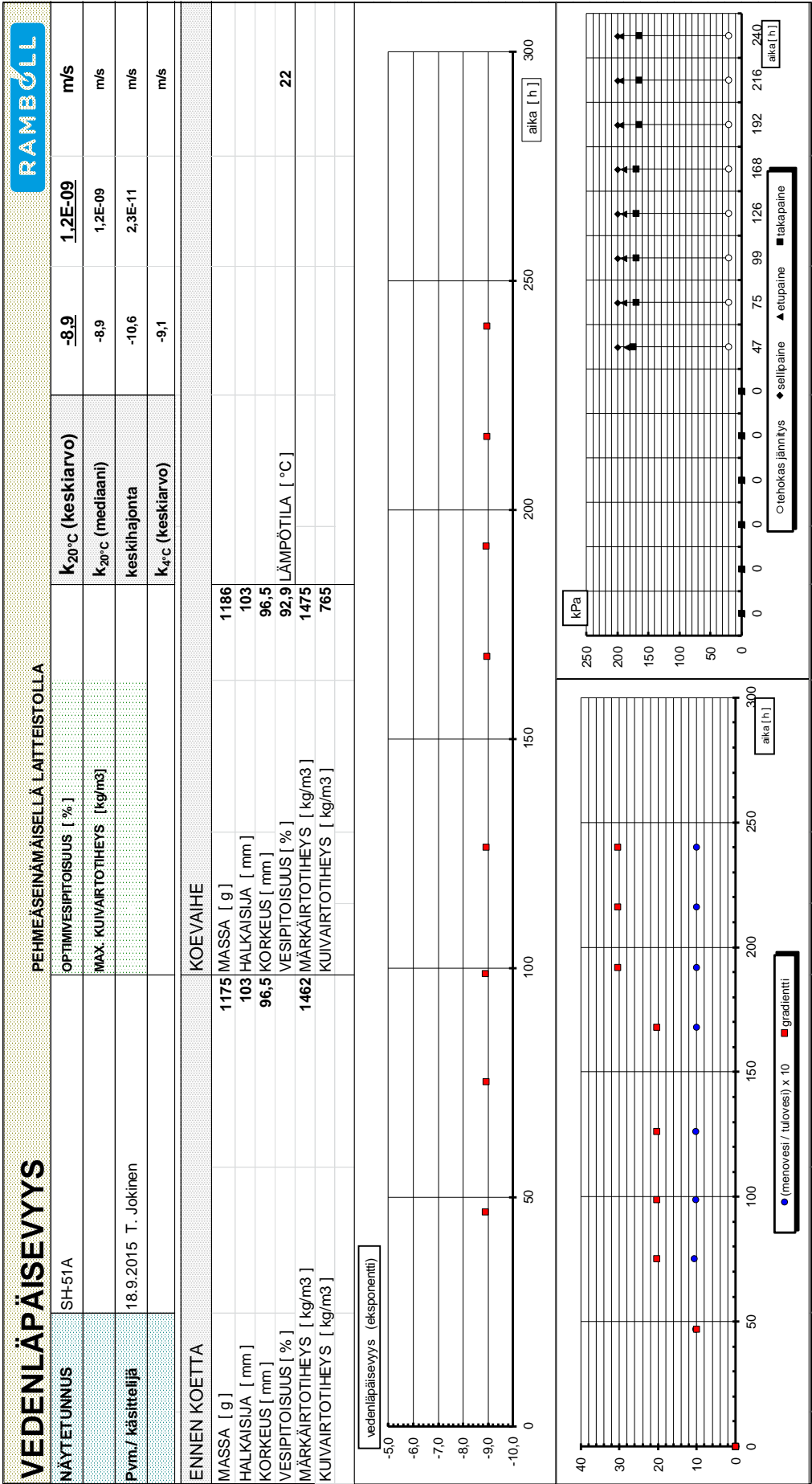


Liite 4: Koekappalenumerot, vedenläpäisevyysmääritykset

Koekappalenumero			
Runkoaine	Ennen stabilointia	28 d	90 d
Sa / Honkasuo	SH-50B	SH-50A	
Sa / Koirapuisto	SH-51C	SH-51A	SH-51B
Sa / Kuohijoki	SH-52C	SH-52A	SH-52B
Tv / Honkasuo	SH-53B	SH-53A	







VEDENLÄPÄISEVYYS

PEHMEÄSEINÄMÄISELLÄ LAITTEISTOLLA

RAMBOLL

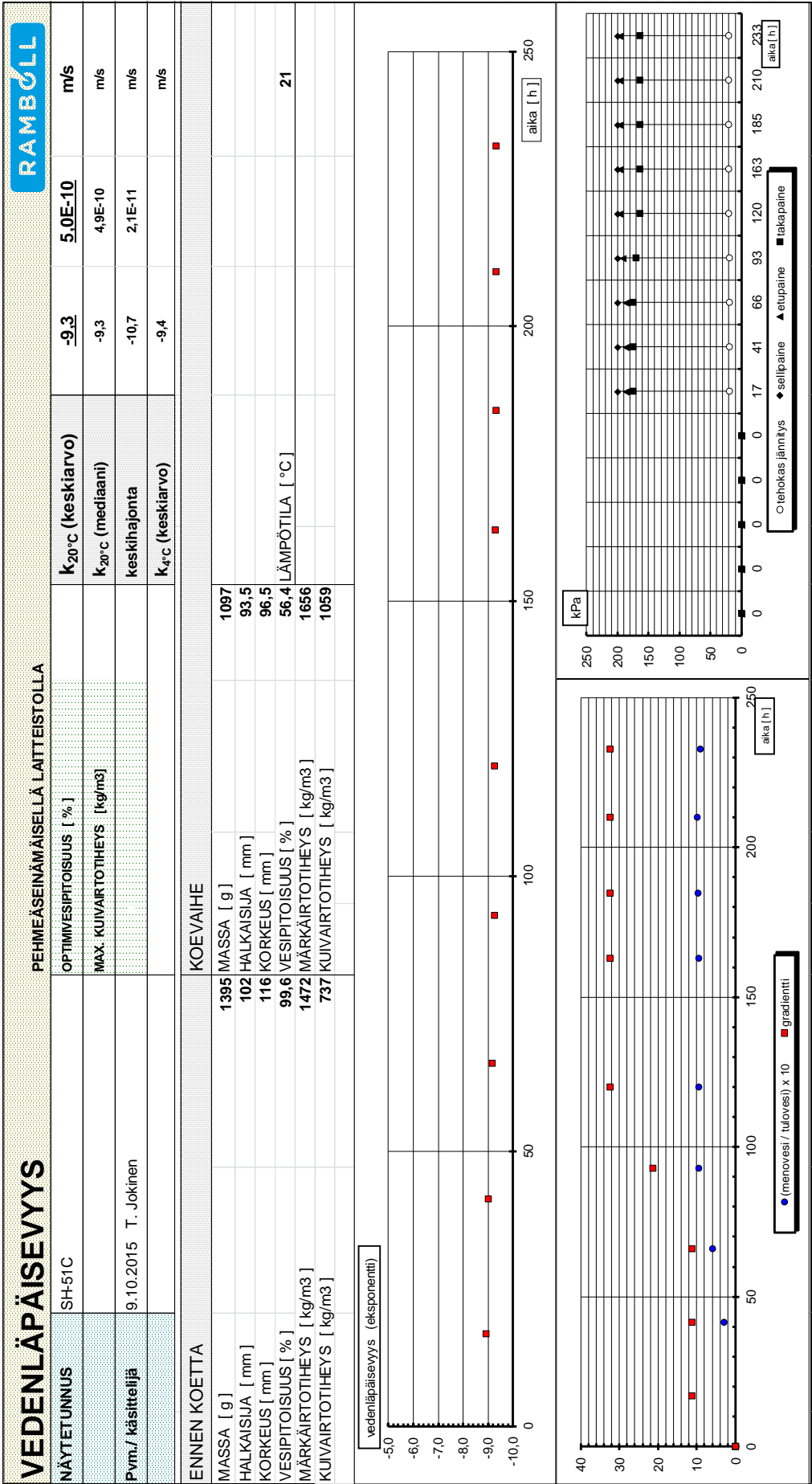
NÄYTETUNNUS	SH-51B	OPTIMIVESIPITOISUUS [%]	K _{20°C} (keskiarvo)	9.0E-10	m/s
		MAX. KUIVAIRTOTIHEYS [kg/m³]	K _{20°C} (mediaani)	-9.0	m/s
Pvm./ käsittelijä	18.9.2015 T. Jokinen		keskihajonta	-11,1	m/s
			K _{4°C} (keskiarvo)	-9.2	m/s

ENNEN KOETTA					
MASSA [g]	1082	MASSA [g]	1095		
HALKAISUA [mm]	103	HALKAISUA [mm]	103		
KORKEUS [mm]	89	KORKEUS [mm]	89		
VESIPITOISUUS [%]		VESIPITOISUUS [%]	93.8	LÄMPÖTILA [°C]	22
MÄRKÄIRTOTIHEYS [kg/m³]	1459	MÄRKÄIRTOTIHEYS [kg/m³]	1477		
KUIVAIRTOTIHEYS [kg/m³]		KUIVAIRTOTIHEYS [kg/m³]	762		

vedenläpäisevyys (eksponentti)

(menovesi / tulovesi) x 10 gradientti

kPa



[illegible]

